



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

IWRAP Mk2 기반의 항로 위험도 및
해상교통혼잡도와의 연관성에 대한 연구

A Study on the correlation between Port waterway risk
based on IWRAP Mk2 and Marine traffic congestion



2018年 07月

韓國海洋大學校 大學院

海 洋 警 察 學 科

李 宜 宗

工學碩士 學位論文

IWRAP Mk2 기반의 항로 위험도 및
해상교통혼잡도와의 연관성에 대한 연구

A Study on the correlation between Port waterway risk
based on IWRAP Mk2 and Marine traffic congestion



指導教授

李 允 石

2018年 07月

韓國海洋大學校 大學院

海 洋 警 察 學 科

李 宜 宗

본 논문을 이의종의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 鞠 承 基 (인)

위 원 尹 貴 鎬 (인)

위 원 李 允 石 (인)



2018년 07월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	iv
Abstract	xi

제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구범위 및 방법	3
제 2 장 해상교통안전성 평가모델 현황	5
2.1 항로 위험도 평가모델	5
2.1.1 IWRAP Mk2 소개	5
2.1.2 IWRAP Mk2의 인과확률 및 기하학적 충돌확률	6
2.2 항로 혼잡도 평가모델	10
2.2.1 해상교통혼잡도 모델 소개	10
2.2.2 해상교통혼잡도의 평가 기준	11
2.3 IWRAP Mk2 및 해상교통혼잡도 특성 비교	14
2.4 기타 해상교통안전성 평가모델	16
2.4.1 PAWSA	16
2.4.2 FSA	16
2.4.3 Gas Model	17
2.4.4 PARK Model	18
2.4.5 NURI Model	18

제 3 장 IWRAP Mk2 기반 항로 위험도	20
3.1 대상 항로 설정 및 기본사항 입력	20
3.1.1 Leg 지정	20
3.1.2 인과확률 입력	27
3.1.3 교통량 입력	27
3.2 IWRAP Mk2에 의한 항로 위험도 분석	28
3.2.1 인천항	29
3.2.2 울산항	35
3.2.3 평택·당진항	43
3.2.4 부산항	47
3.2.5 부산항신항	54
3.2.6 대산항	59
3.3 평가결과	65
3.3.1 항로 위험도 분석 결과	65
3.3.2 충돌확률에 영향을 주는 변수 검토	67
제 4 장 해상교통혼잡도 기반 항로 혼잡도	72
4.1 대상 항로 설정 및 기본사항 입력	72
4.1.1 항로폭 지정	72
4.1.2 통항선속 입력	75
4.2 해상교통혼잡도에 의한 항로 혼잡도 분석	77
4.2.1 인천항	77
4.2.2 울산항	77
4.2.3 평택·당진항	78
4.2.4 부산항	78
4.2.5 부산항신항	79
4.2.6 대산항	80
4.3 평가 결과	81
4.3.1 항로 혼잡도 분석 결과	81
4.3.2 해상교통혼잡도에 영향을 주는 변수 검토	84

제 5 장	항로 위험도 및 혼잡도와의 연관성 분석	87
5.1	IWRAP Mk2 및 해상교통혼잡도 평가 결과	87
5.2	그룹 설정	89
5.2.1	일평균 통항척수 그룹 상세	91
5.2.2	항로폭 그룹 상세	92
5.2.3	통항선속 그룹 상세	93
5.3	분석결과	94
5.3.1	일평균 통항척수 그룹 분석결과	94
5.3.2	항로폭 그룹 분석결과	96
5.3.3	통항선속 그룹 분석결과	99
5.3.4	그룹별 평균값(Mean) 연관성 분석결과	101
5.4	종합결과	103
제 6 장	결론	105



List of Tables

Table 1 Causation Probability value applied in IWRAP Mk2	7
Table 2 Length and conversion Factor of Korea port of entry Ship(2003)	13
Table 3 Feature comparison of IWRAP Mk2 and Marine Traffic Congestion	15
Table 4 Characteristics of Leg - Incheon	21
Table 5 Characteristics of Leg - Ulsan	22
Table 6 Characteristics of Leg - Pyongteak·Dangjin	23
Table 7 Characteristics of Leg - Busan	24
Table 8 Characteristics of Leg - Busan Newport	25
Table 9 Characteristics of Leg - Deasan	26
Table 10 Causation Probability value applied in This Study (Global value)	27
Table 11 Input date by trade port	28
Table 12 Collision probability - Incheon	33
Table 13 Collision probability - Ulsan	41
Table 14 Collision probability - Pyongteak·Dangjin	45
Table 15 Collision probability - Busan	52
Table 16 Collision probability - Busan Newport	57
Table 17 Collision probability - Deasan	63
Table 18 Collision probability by Port waterway	66
Table 19 Multiple regression analysis ratings	68
Table 20 Independent Variables Affecting Dependent Variables	69
Table 21 Status for Port waterway width and Average speed	75

Table 22	Result of Marine traffic congestion - Incheon	77
Table 23	Result of Marine traffic congestion - Ulsan	78
Table 24	Result of Marine traffic congestion - Pyongteak·Dangjin	78
Table 25	Result of Marine traffic congestion - Busan	79
Table 26	Result of Marine traffic congestion - Busan New Port	80
Table 27	Result of Marine traffic congestion - Deasan	80
Table 28	Result of Average marine traffic congestion and Peak marine traffic congestion	82
Table 29	Result of and by port	83
Table 30	Independent Variables Affecting Dependent Variables	84
Table 31	Collision probability and Congestion of port waterway	88
Table 32	Set the group	90
Table 33	Set the group for Dairy average traffic volume	91
Table 34	Set the group for Port waterway width	92
Table 35	Set the group for Passing speed	93
Table 36	Mean per Group()	96
Table 37	Mean per Group()	98
Table 38	Mean per Group()	101
Table 39	Independent Variables Affecting Dependent Variables	102
Table 40	Correlation(Pearson) between and	103

List of Figures

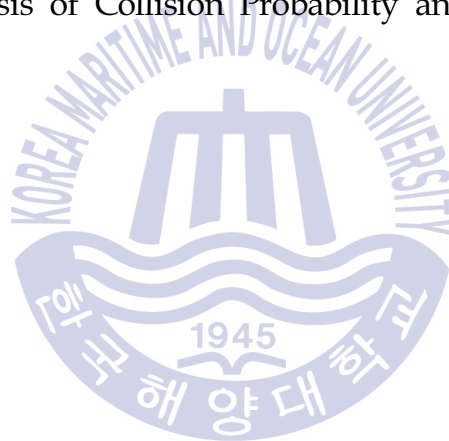
Fig. 1 Marine accident	1
Fig. 2 Flow Chart of Study	4
Fig. 3 Bayesian Network model for ship-ship collisions accounting for the correlation between the two vessels	7
Fig. 4 Example of head-on situation	9
Fig. 5 Example of Crossing waterways with risk area of ship-ship collision ·	9
Fig. 6 Ship's Domain in Ocean	10
Fig. 7 Ship's Domain in narrow Waterway and port	11
Fig. 8 Five main steps used in the PAWSA	16
Fig. 9 Flow chart of the FSA process	17
Fig. 10 Gas Model	17
Fig. 11 Risk evaluation of PARK Model	18
Fig. 12 Risk factor sorting of NURI model	19
Fig. 13 Setting the leg - Incheon	21
Fig. 14 Setting the leg - Ulsan	22
Fig. 15 Setting the leg - Pyongteak·Dangjin	23
Fig. 16 Setting the leg - Busan	24
Fig. 17 Setting the leg - Busan New Port	25
Fig. 18 Setting the leg - Deasan	26
Fig. 19 Traffic Volume Distribution chart - Incheon 동수도	29
Fig. 20 Traffic Volume Distribution chart - Incheon 서수도	30
Fig. 21 Trafifc Volume Distribution chart - Incheon 3항로(West bound)	30
Fig. 22 Trafifc Volume Distribution chart - Incheon 3항로(East bound)	31

Fig. 23 Traffic Volume Distribution chart - Incheon 1항로 입항	31
Fig. 24 Traffic Volume Distribution chart - Incheon 1항로 출항	32
Fig. 25 Traffic Volume Distribution chart - Incheon 인천대교 (North bound)	32
Fig. 26 Traffic Volume Distribution chart - Incheon 인천대교 (South bound)	33
Fig. 27 Traffic data for distribution and density - Incheon	34
Fig. 28 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제1항로(North bound) ·	35
Fig. 29 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제1항로(South bound) ·	36
Fig. 30 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제2항로(West bound)	36
Fig. 31 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제2항로(East bound)	37
Fig. 32 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제1,2항로(North bound)	37
Fig. 33 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제1,2항로(South bound)	38
Fig. 34 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제3항로(West bound)	38
Fig. 35 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제3항로(East bound)	39
Fig. 36 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제4항로(North bound)	39
Fig. 37 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제4항로(South bound)	40
Fig. 38 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 울산진입항로 (North bound)	40
Fig. 39 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 울산진입항로 South bound)	41
Fig. 40 Traffic data for distribution and density - Ulsan	42
Fig. 41 Traffic Volume Distribution chart - Pyongteak·Dangjin 진입항로 (North bound)	43
Fig. 42 Traffic Volume Distribution chart - Pyongteak·Dangjin 진입항로 (South bound)	44
Fig. 43 Traffic Volume Distribution chart - Pyongteak·Dangjin 서부두 시점 (West bound)	44

Fig. 44 Traffic Volume Distribution chart - Pyongteak·Dangjin 서부두 시 점(East bound)	45
Fig. 45 Traffic data for distribution and density - Pyongteak·Dangjin ..	46
Fig. 46 Traffic Volume Distribution chart - Busan 조도방파제(West bound)	47
Fig. 47 Traffic Volume Distribution chart - Busan 조도방파제(East bound)	48
Fig. 48 Traffic Volume Distribution chart - Busan 부산항대교(West bound)	48
Fig. 49 Traffic Volume Distribution chart - Busan 부산항대교(East bound)	49
Fig. 50 Traffic Volume Distribution chart - Busan 부산대교(North bound)	49
Fig. 51 Traffic Volume Distribution chart - Busan 부산대교(South bound)	50
Fig. 52 Traffic Volume Distribution chart - Busan 남항대교(North bound)	50
Fig. 53 Traffic Volume Distribution chart - Busan 남항대교(South bound)	51
Fig. 54 Traffic Volume Distribution chart - Busan 감천항방파제(North bound)	51
Fig. 55 Traffic Volume Distribution chart - Busan 감천항방파제(South bound)	52
Fig. 56 Traffic data for distribution and density - Busan	53
Fig. 57 Traffic Volume Distribution chart - Busan Newport 동방파제 (North bound)	54
Fig. 58 Traffic Volume Distribution chart - Busan Newport 동방파제 (East bound)	55
Fig. 59 Traffic Volume Distribution chart - Busan Newport 토도남측 (West bound)	55
Fig. 60 Traffic Volume Distribution chart - Busan Newport 토도남측 (East bound)	56
Fig. 61 Traffic Volume Distribution chart - Busan Newport 토도북측 (West bound)	56
Fig. 62 Traffic Volume Distribution chart - Busan Newport 토도북측 (East bound)	57
Fig. 63 Traffic data for distribution and density - Busan Newport	58
Fig. 64 Traffic Volume Distribution chart - Deasan 대산항 항계선	

(West bound)	59
Fig. 65 Traffic Volume Distribution chart - Deasan 대산항 항계선	
(East bound)	60
Fig. 66 Traffic Volume Distribution chart - Deasan 제1항로(West bound)	60
Fig. 67 Traffic Volume Distribution chart - Deasan 제1항로(East bound)	61
Fig. 68 Traffic Volume Distribution chart - Deasan 흑어도북측	
(West bound)	61
Fig. 69 Traffic Volume Distribution chart - Deasan 흑어도북측	
(East bound)	62
Fig. 70 Traffic Volume Distribution chart - Deasan 비경도서측	
(West bound)	62
Fig. 71 Traffic Volume Distribution chart - Deasan 비경도서측	
(East bound)	63
Fig. 72 Traffic data for distribution and density - Deasan	64
Fig. 73 Collision probability by Port waterway	65
Fig. 74 Dairy average traffic volume - Collision probability	70
Fig. 75 Port waterway width - Collision probability	70
Fig. 76 Passing speed - Collision probability	71
Fig. 77 Ship's Domain in narrow Waterway and port	72
Fig. 78 Marine traffic congestion measurement point	73
Fig. 79 Status for Port waterway width	74
Fig. 80 Status for Port waterway width and Passing speed	76
Fig. 81 Result of Average marine traffic congestion and Peak marine traffic congestion	81
Fig. 82 Correlation of and	83
Fig. 83 Dairy average traffic volume - Marine traffic congestion	85
Fig. 84 Port waterway width - Marine traffic congestion	86
Fig. 85 Passing speed - Marine traffic congestion	86

Fig. 86 Collision Probability - Marine traffic congestion	88
Fig. 87 Correlation for Collision Probability and Congestion - Group A ...	94
Fig. 88 Correlation for Collision Probability and Congestion - Group B ...	95
Fig. 89 Correlation for Collision Probability and Congestion - Group C ...	95
Fig. 90 Correlation for Collision Probability and Congestion - Group A	97
Fig. 91 Correlation for Collision Probability and Congestion - Group B	97
Fig. 92 Correlation for Collision Probability and Congestion - Group C ...	98
Fig. 93 Correlation for Collision Probability and Congestion - Group A ...	99
Fig. 94 Correlation for Collision Probability and Congestion - Group B ·	100
Fig. 95 Correlation for Collision Probability and Congestion - Group C ·	100
Fig. 96 Regression analysis of Collision Probability and Congestion	102



A Study on the correlation between Port waterway risk based on IWRAP Mk2 and Marine traffic congestion

Lee EuiJong

Department of Coast Guards Studies

Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

South Korea has a high level of dependence on exports. The proportion of South Korea's trade is 69.93% which is only second to Germany at 70.85% using data from the Group of 20(G20) in 2015.

Maritime transport can reduce cost with mass transportation to abroad which is very important to South Korea, especially reliance on the most of trade to exports.

The maritime industry for maritime transport is becoming enlargement, automation, speed up and marine traffic volume is also increasing.

According to the industry changes, maritime traffic environment will become increasingly congested, thus ensuring the safety of maritime transport is more important.

If Marine accidents happen, serious damage to human life and

environmental damage can occur. Compensation for the loss and responsibility for the accident can cause an international dispute. This shows that managing marine accident is in a difficult process.

In order to prevent marine accidents and identify risk factors in advance, IMO(International Maritime Organization) uses FSA(Formal Safety Assessment) and IALA(International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities) uses IWRAP(IALA Waterway Risk Assessment Program) and PAWSA(Port and Waterways Safety Assesment).

The Marine Traffic Safety Act was amended on May 27th, 2009. All of marine development projects (port construction, development, bridges, maritime works, etc.) investigate how the projects are effected to marine traffic, and it is able to reflect each project plan. “Maritime Safety Audit Scheme“, also has implemented since November 28th, 2009.

There is a public opinion to difficult understand the result value of Marine traffic congestion assessment in “Maritime Safety Audit Scheme” unless people have the background knowledge of marine industry.

Furthermore, “Maritime Safety Audit Scheme”, it interprets that dangerous situations such as collision may occur if marine traffic congestion is high. However, there are cases where the congestion rate is high but the rate of accidents is low or the operators don’ t feel a severe risk.

Therefore, it needs a review of the correlation between marine traffic congestion and dangerous situation such as collision.

The purpose of this study is to evaluate the risk of the sea route using IWRAP Mk2, which quantitatively evaluates the collision and stranding probability, and it compares with the marine traffic congestion to examine whether the risk and congestion are correlated.

And the results of this study will be used as basic data for developing a suitable risk assessment model for Korea port waterway.

KEY WORDS: IWRAP Mk2, Marine Traffic Congestion, Port waterway Risk assessment, Risk assessment, Correlation



제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라의 경우, 경제에서 차지하는 무역의존도가 매우 높은 나라로 2015년도 무역의존도는 G20 국가 중 독일 70.85에 이어 한국 69.93으로서 2위로 나타났다. 이처럼 무역의존도가 높은 우리나라에서의 해상운송은 대량수송이 가능하고, 경제성이 있으며, 원거리 국제운송이 가능하기 때문에 매우 중요하다.

해상운송을 위한 해사산업은 점점 대형화 및 고속화, 자동화되고 있으며, 해상교통량 또한 증가하고 있기 때문에 해상교통환경은 점차 혼잡한 상황이 발생할 것이며, 이는 해상운송의 안전성 확보가 더욱 중요해지는 계기가 된다.

실제 해상에서 대형 선박사고가 발생할 경우, 막대한 인명·환경 피해를 초래하게 되고, 이에 따른 사고 책임과 피해 보상을 둘러싼 논란 또한 쉽게 종식되지 않을뿐더러 국제사회문제까지 야기될 수 있다. 이는 선박사고가 발생할 경우, 그만큼 사고수습에 대한 과장과 후유증이 심각하다는 것을 보여준다.[1]



Fig. 1 Marine accident

이처럼 해양사고를 방지하고, 사전에 위험요소를 식별 또는 평가하기 위해 국제해사기구(International Maritime Organization, 이하 IMO)에서는 공식 안전성 평가 모델인 FSA(Formal Safety Assessment)를 따르고 있으며, 국제항로표지협회(International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, 이하 IALA)는 항만 및 제한된 수로에서의 위해도 관리를 위한 정량적인 평가모델인 IWRAP(IALA Waterway Risk Assessment Program) 및 정성적인 평가모델인 PAWSA(Port and Waterways Safety Assessment)를 사용하고 있다.

이에 우리나라에서는 2009년 5월 27일 해사안전법 개정을 통해 해양개발사업(항만건설, 개발, 교량, 해상공사 등)이 선박통항에 미치는 영향을 사전에 조사·측정 및 평가하여 설계에 반영토록 함으로써 보다 미래지향적이고 안전친화적인 개발이 되도록 하는 일련의 과정을 마련하였으며, 같은 해 11월 28일 “해상교통안전진단제도” [2]를 본격 시행하였다.

“해상교통안전진단제도” 평가 항목 중 항로용량 대비 해상교통량을 수치화한 ‘해상교통혼잡도 평가’의 경우, 그 결과 값이 운항자의 입장에서 위험도를 판단하기 어렵고, 많은 사람들이 해상의 특수성을 이해하고 보지 않으면 해석하기가 어렵다는 의견이 종종 제시된다.

또한 해상교통안전진단에서는 혼잡도가 높으면 충돌과 같은 위험상황이 발생할 개연성이 존재한다고 해석하고 있으나, 실제 혼잡도가 상당히 높음에도 불구하고 사고 발생률이 낮거나 선박 운항자들이 큰 부담을 느끼지 않는 해역도 존재한다. 이에 혼잡도가 높으면 실제로도 충돌과 같은 위험상황이 발생할 확률도 높다고 할 수 있는지에 대한 정량적인 검토가 필요하다.

이 연구의 목적은 충돌·좌초 위험확률을 산출하는 정량적 평가모델인 IWRAP Mk2를 기반으로 항로의 위험도를 평가하고, 이를 해상교통혼잡도와 비교하여 위험도와 혼잡도가 상호 연관성을 가지는지 검토하는 것이다. 또한 검토 결과를 이용하여 우리나라 항로에 적합한 위험도 평가모델 개발을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

1.2 연구범위 및 방법

본 연구는 국내외 해상교통안전성 평가모델의 특성을 비교하고, 그 중 정량적인 평가모델인 IWRAP Mk2와 해상교통혼잡도를 활용하여, 위험도 및 해상교통 혼잡도가 상호 연관성이 존재하는지 검토하였다. 또한 각 모델에 기인하는 변수를 파악하고, 변수별 그룹을 형성, 특성파악 및 평균값을 이용한 연관성을 검증하고자 하였다. 본 연구의 구체적인 연구방법과 흐름은 다음과 같다.

(1) 국내외 해상교통안전성 평가모델에 대하여 소개하고 각 모델의 특징 및 세부사항에 대하여 검토하였다.

(2) IWRAP Mk2를 이용하여 국내 주요 항로의 위험도를 분석하고, 위험도에 기인하는 변수에 대하여 검토하였다.

(3) 해상교통혼잡도를 이용하여 국내 주요 항로의 평균 혼잡도 및 최대 혼잡도를 분석하고, 혼잡도에 기인하는 변수에 대하여 검토하였다.

(4) IWRAP Mk2에 의한 항로 위험도 및 해상교통혼잡도에 의한 혼잡도가 연관성을 가지는지 검토하였다.

(5) 이 연구에서 도출된 결론을 토대로 항로 위험도 및 혼잡도의 연관성과 활용방안, 개선점 및 새로운 모델의 필요성 등을 제시하였다.

연구의 정확성을 위하여 실제 AIS Data를 이용하려 했으며, 동일한 기간의 AIS Data를 입수하기에는 어려움이 있어 실무를 진행하며 수집된 2014년~2016년의 AIS Data를 활용하였다. 향후 신뢰성 향상과 더불어 새로운 지표의 수립을 위해서는 가급적 비슷한 기간의 국내 모든 항만 및 항로의 Database를 수집하여 평가하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

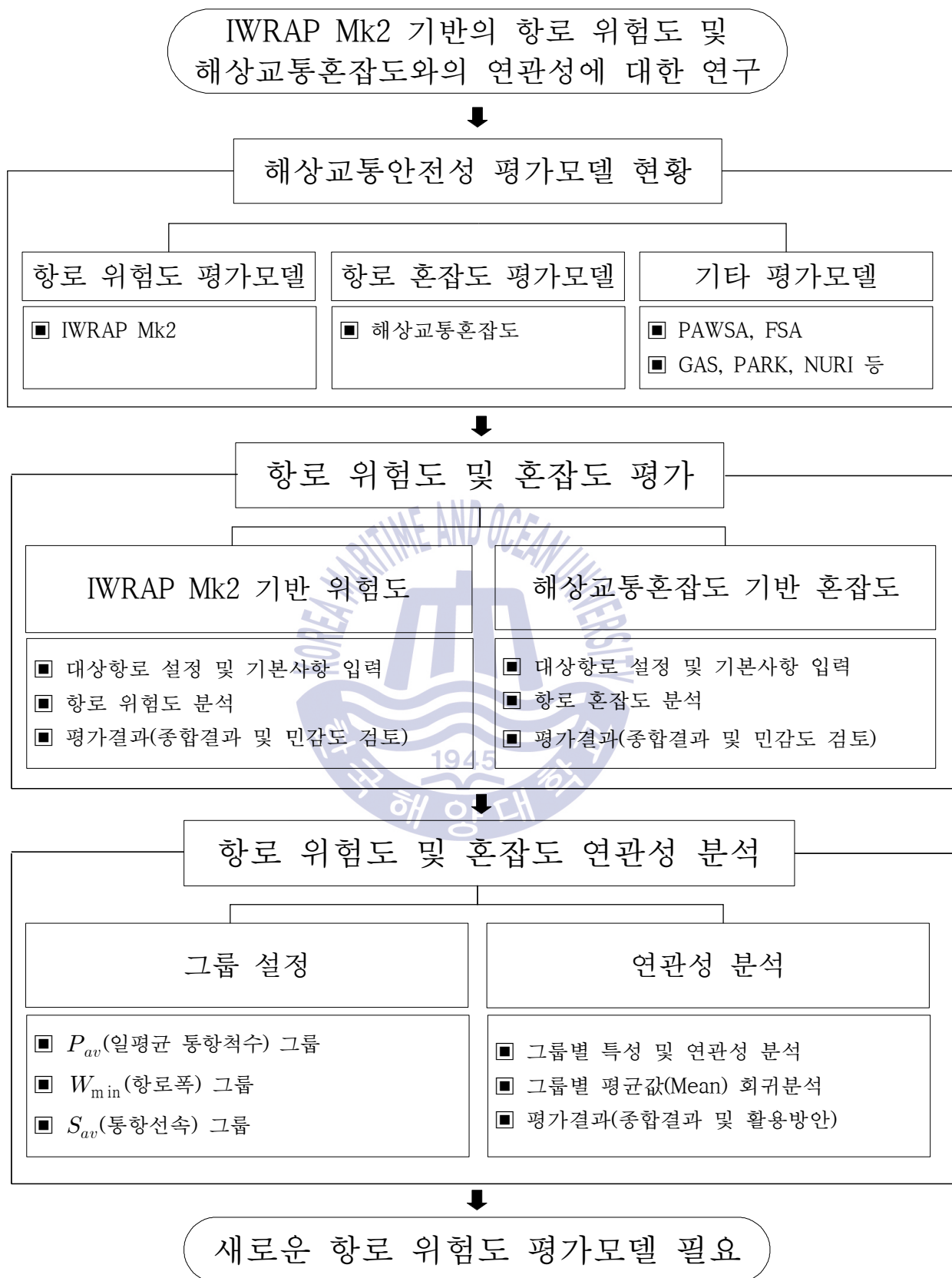


Fig. 2 Flow Chart of Study

제 2 장 해상교통안전성 평가모델 현황

2.1 항로 위험도 평가 모델

2.1.1 IWRAP Mk2 소개

IWRAP은 “IALA Waterway Risk Assessment Program” 으로 항만수로의 위험도(선박의 충돌 및 좌초빈도)를 분석하는 정량적인 평가모델이다. 이 모델은 1998~2001년 캐나다 Coast Guard와 덴마크공대(Technical University of Denmark)가 공동으로 ISECO Project에 의해 개발되었으며, 상용화 및 지속적인 기능개선 등으로 현재 IWRAP Mk2 버전이 사용된다.

IWRAP Mk2는 특정수역에서 선박의 충돌 및 좌초의 위험도를 평가하는 프로그램으로 선박의 종류 및 크기, 선박의 통행 data 등을 이용하여 항로의 위험도를 분석하는 모델이다. IWRAP Mk2는 지극히 정량적 평가방법(Quantitative Risk Assessment)으로 IALA에서는 정량적 평가방법(Quantitative Risk Assessment)과 정성적 평가방법(Qualitative Risk Assessment)을 상호 보완하여 위험도를 평가하도록 권고하고 있다.

IWRAP Mk2에 입력하는 Data는 크게 선박 Data인 선박종류, 선속, 선박의 길이와 폭, 환경 Data인 항로폭, 수심, 장애물, 기타 장애요인, 동적 Data인 선박 통행 등이며, 이러한 입력요소들을 IWRAP Mk2의 위험도 분석 모델을 통하여 수학적으로 계산하여, 충돌 및 좌초가 발생할 확률을 보여준다.

IWRAP Mk2에서 계산하는 기본적인 선박의 사고확률은 2개의 독립된 사건인 기하학적 충돌확률과 인과확률(충돌회피를 실패할 확률)이 동시에 일어나는 것으로 산출하며, 다음의 식과 같다.

$$\lambda_{Col} = P_C \cdot N_G \quad (3)$$

λ_{Col} (or grounding, λ_{Grnd}) : 충돌확률(또는 좌초확률)

P_c : 인과확률(Causation Probability)

N_G : 기하학적 충돌확률(Geometrical Probability)

IWRAP Mk2은 IALA에서 공식적으로 추천하고 있는 정량적인 안전성 평가모델 중 하나로, 수로의 기하학적 형태와 교통량 등을 기반으로 해당 수로에서 선박의 충돌 및 좌초빈도를 정량적으로 제시할 수는 있으나, 선박운항자의 주관적 위험에 대한 평가는 반영될 수 없다는 한계를 가지고 있다.[3]

2.1.2 인과확률 및 기하학적 충돌확률

식 (3)에서 제시하는 인과확률이란 충돌 또는 좌초에 이르는 침로에서 충돌회피동작을 실패할 확률로 이는 정해진 수치가 아닌 지리적, 환경적 요인에 따라 변화하며, 평가 대상 해역에 따라 해당 Factor를 변경할 수 있다. IWRAP Mk2에서는 기본적으로 제공하는 값이 존재하며, 이는 Fujii and Mizuki's observations을 따른다.[4]

인과확률의 경우, 전통적으로 사용되는 Fault tree analysis(결함수 분석) 또는 Event tree analysis(사건수 분석)가 있으나,[5] 이 분석방법에서는 조건부 의존성 또는 상호배타적인(예, 맑은 날 태풍 또는 우박 등) 것을 포함할 수 없다는 한계가 존재한다. 따라서 이를 극복하고자 IWRAP Mk2에서는 전통적인 분석법을 사용하지 않고, Bayesian network를 이용하고 있으며,[6] Fig. 2와 같이 두 선박의 조건부 확률을 서로 연관 짓고자 하였다.

본 연구에서는 Table 1과 같이 IWRAP Mk2에서 기본 값으로 제공하는 Global Value(Default)를 적용하였으나 IWRAP Mk2에서는 인과확률(Causation Probability)의 값을 항만의 특성에 맞도록 수정하여 적용하도록 권고하고 있다. 따라서 항만의 특성을 반영한 신뢰성 있는 결과 값을 위해서는 국내 항로에 적합한 값의 검증 또는 수정이 필요할 것으로 판단된다.

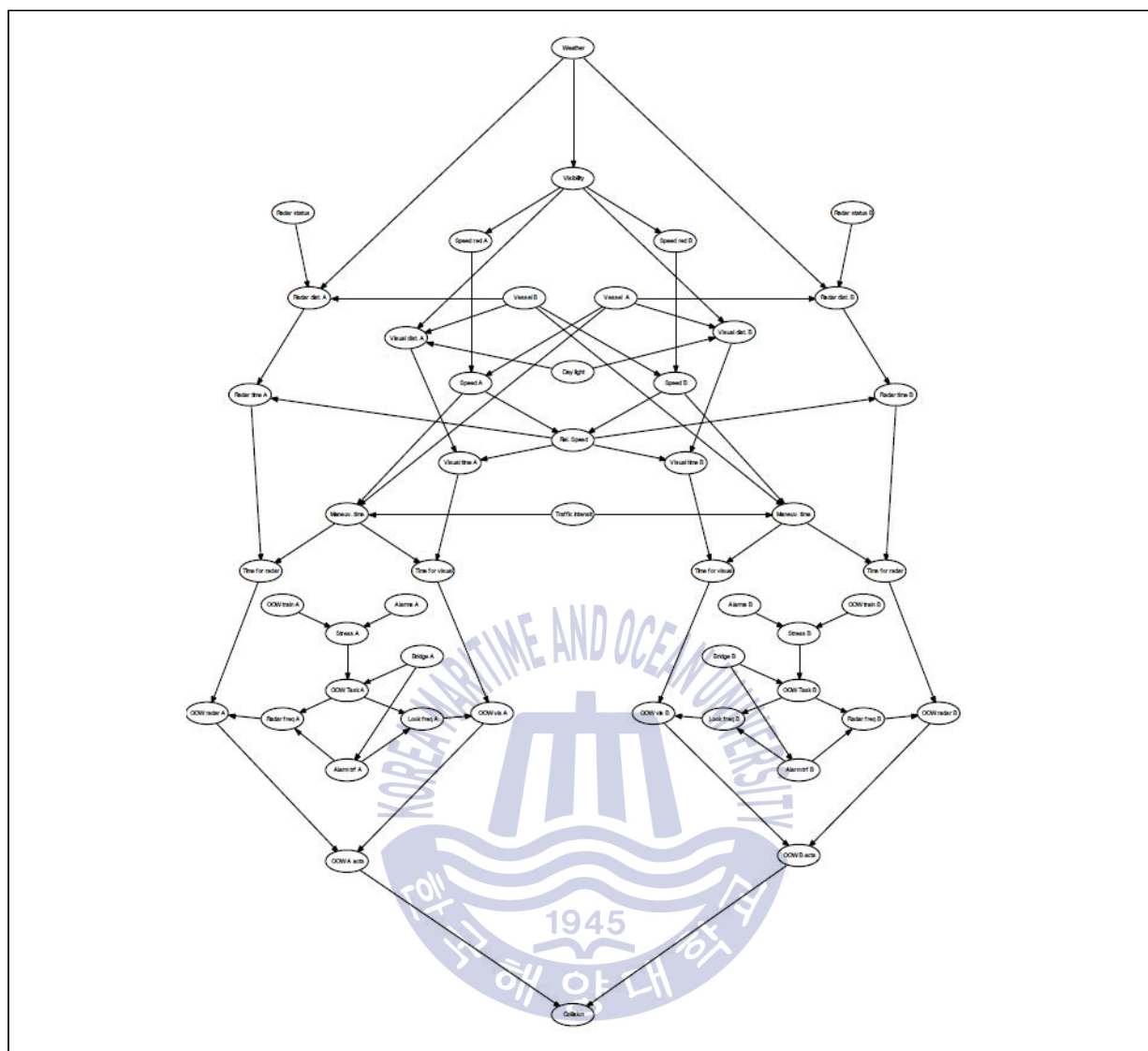


Fig. 3 Bayesian Network model for ship-ship collisions accounting for the correlation between the two vessels

Table 1 Causation Probability value applied in IWRAP Mk2

Condition	Causation factor
Head on Collisions	$0.5 * 10^{-4}$
Overtaking Collisions	$1.1 * 10^{-4}$
Crossing Collisions	$1.3 * 10^{-4}$
Collisions in bend	$1.3 * 10^{-4}$
Collisions in merging	$1.3 * 10^{-4}$
Grounding – forget to turn	$1.6 * 10^{-4}$

기하학적 충돌확률은 충돌 또는 좌초에 이르는 침로에서 충돌회피동작을 실패할 확률로 IWRAP Mk2에서는 Head-on, Overtaking, Crossing, Merging, Bending, Grounding으로 분류되며, 식(4)~(6)과 같이 실제 교통량을 이용하여 항로폭, 표준정규분포함수, 교차각, 상대속력, 선종별 평균속력, 선종별 통항량 등을 기하학적으로 직접 산출하여 계산된다.

$$N_G^{head-on} = L_w \sum_{i,j} P_{G_{i,j}}^{head-on} \frac{V_{i,j}}{V_i^{(1)} V_j^{(2)}} (Q^{(1)} Q^{(2)}) \quad (4)$$

$$P_{G_{i,j}}^{head-on} = \Phi\left(\frac{\bar{B}_{i,j} - \mu_{i,j}}{\sigma_{i,j}}\right) - \Phi\left(-\frac{\bar{B}_{i,j} + \mu_{i,j}}{\sigma_{i,j}}\right) \quad (5)$$

$$N_G^{crossing} = \sum_{i,j} \frac{Q_i^{(1)} Q_j^{(2)}}{V_i^{(1)} V_j^{(2)}} D_{ij} V_{ij} \frac{1}{\sin\theta} \quad \text{for } 10^\circ < |\theta| < 170^\circ \quad (6)$$

$V_{i,j}$: 선종(i,j)별 통항 선박간의 상대속력

$V_i^{(1)}$: i 선종 선박의 (1)방향 평균 통항속력

$V_j^{(2)}$: j 선종 선박의 (2)방향 평균 통항속력

L_w : 항로폭

Q : 선박 통항량

$P_{G_{i,j}}^{head-on}$: head-on 상태에서 선박이 충돌할 확률

$\mu_{i,j}$: 통항 분포의 평균치

$\Phi(x)$: 표준정규분포함수

$\sigma_{i,j}$: 선종(i,j)별 표준편차 ($\sigma_{i,j} = \sqrt{(\sigma_i^{(1)})^2 + (\sigma_j^{(2)})^2}$)

$\bar{B}_{i,j}$: 선종(i,j)별 평균 선박 폭 ($\bar{B}_{i,j} = \frac{B_i + B_j}{2}$)

$D_{i,j}$: 기하학적 충돌반경

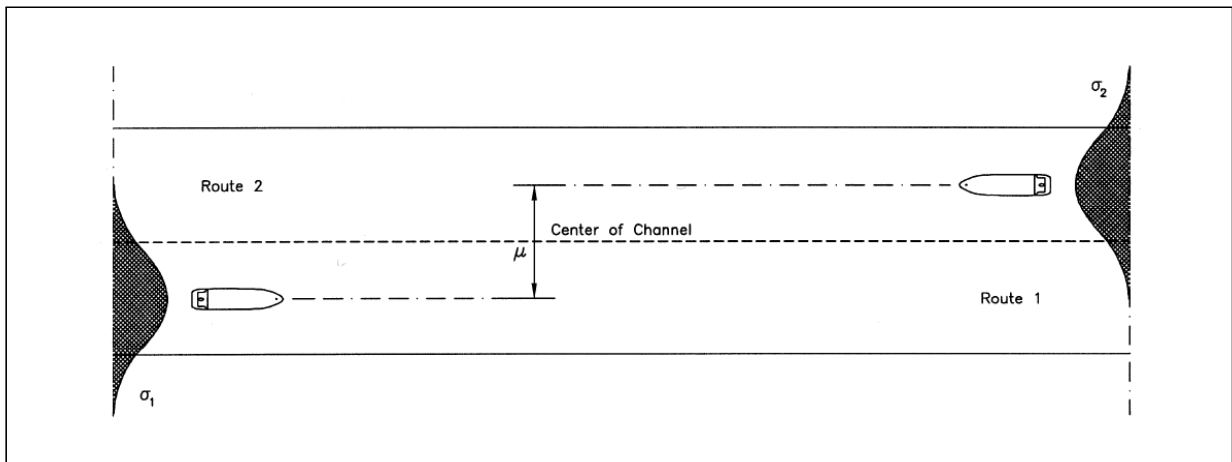


Fig. 4 Example of head-on situation

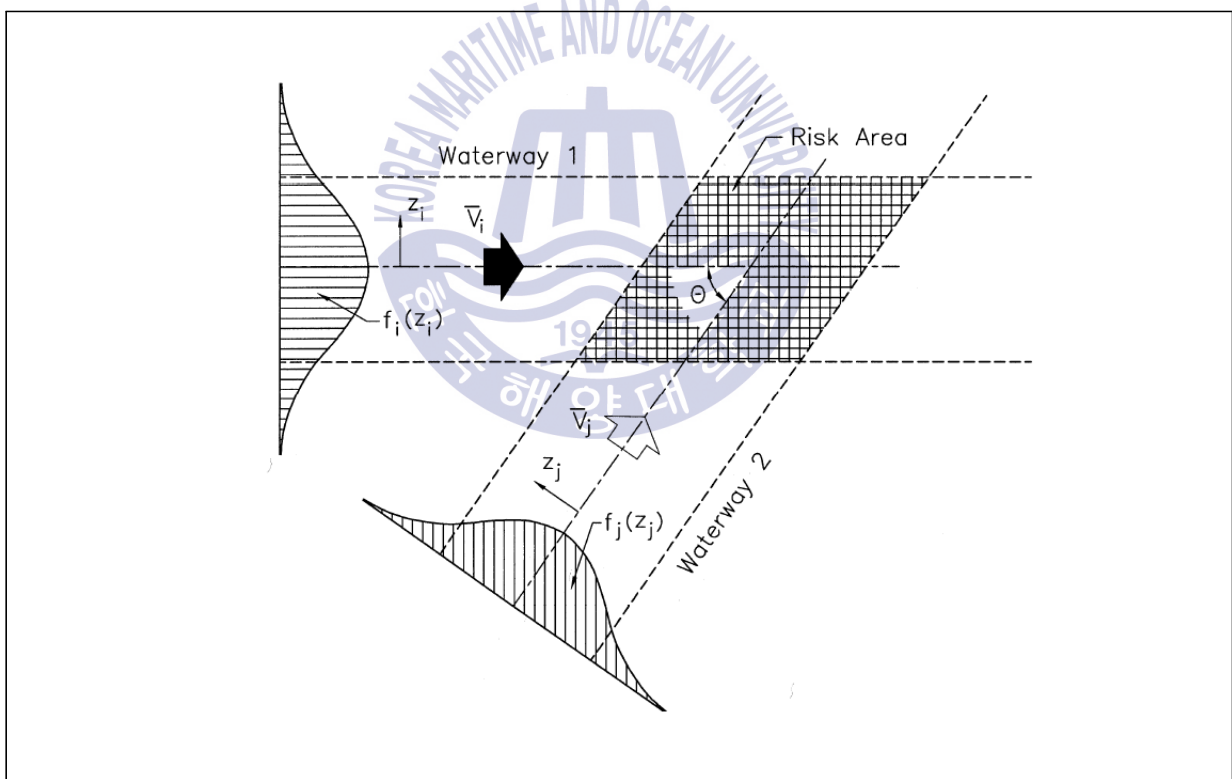


Fig. 5 Example of Crossing waterways with risk area of ship-ship collision

2.2 항로 혼잡도 평가모델

2.2.1 해상교통혼잡도 모델 소개

해상교통혼잡도는 해당 항로를 이용하는 해상교통량을 수용능력 대비 실제 해상교통량을 백분율로 표시한 지표로, 일정기간 동안 측정된 해상교통조사 자료를 바탕으로 항로의 교통용량을 측정하고, 환산교통량을 산정하여 과거, 현재 및 장래에 해당 항로의 혼잡상황을 평균적으로 나타낼 수 있다.

국내 해상교통안전진단 시행지침에서는 해상교통현황측정에 해상교통혼잡도의 측정 및 평가 항목을 적용하여 과거 및 현재의 해상교통량을 측정하고, 대상 통항로가 수용 가능한 교통 용량을 분석하여 분석 결과에 따른 개선점을 제시하도록 하고 있다.[7] 해상교통혼잡도 분석시 해당 해역의 통항 특성을 반영할 수 있는 모델 선정이 중요한데 본 연구에서는 국내 해상교통혼잡도 연구에 통상적으로 많이 사용되었던 Bumper 모델을 사용하여 해상교통혼잡도를 분석하였다.

해상교통혼잡도 이론 중 가장 널리 사용하고 있는 Bumper 이론은 일본 해상교통공학에서 유래되었으며, 본선을 운항하는 항해사가 타 선박 또는 장애물의 진입을 허용하지 않는 점유영역(Ship's Domain)이 존재하며, 이러한 영역이 해역의 상태에 따라 다르게 적용된다는 이론이다.[8]

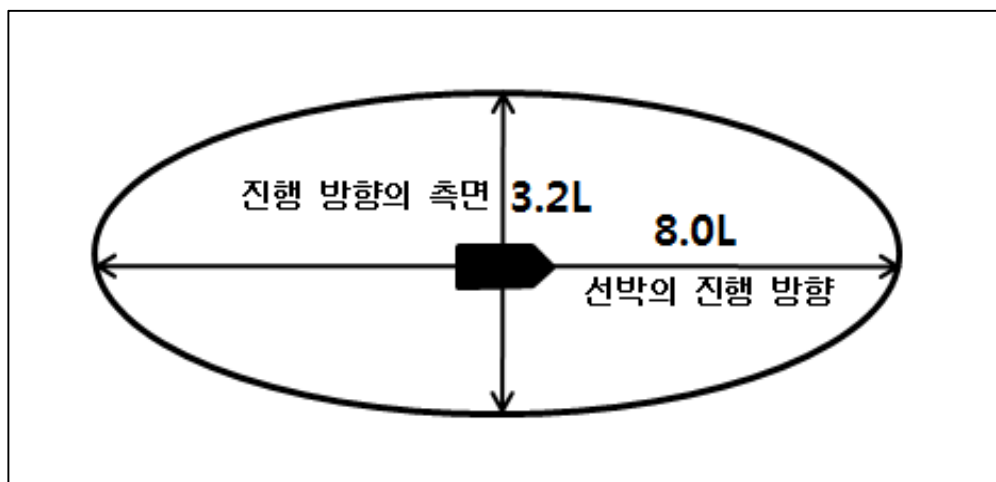


Fig. 6 Ship's Domain in Ocean

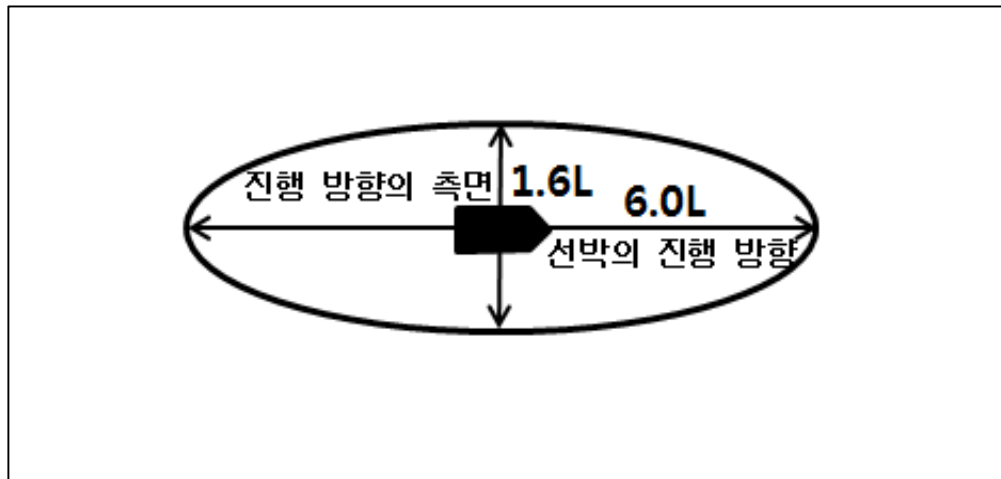


Fig. 7 Ship' s Domain in narrow Waterway and port

2.2.2 해상교통혼잡도의 평가 기준

이러한 Bumper 이론을 적용하고, 해상교통량(Q_T)을 추정하여 항로가 수용할 수 있는 최대 교통용량(실용교통용량, Q_P)과 비교함으로써 해상교통 혼잡도(T_C)를 평가한다.[9]

$$T_C (\%) = \frac{Q_T}{Q_P} \times 100 (\%) \quad (7)$$

T_C : 해상교통혼잡도

Q_T : 해상교통량

Q_P : 실용교통량(항로가 수용할 수 있는 최대교통량)

또한 항로가 수용할 수 있는 최대 교통용량은 항로폭과 항로에서의 평균 선속을 곱한 값을 선박의 점유영역의 크기로 나누어 구하며, 식(8)과 같이 표현된다.

$$Q = \frac{1}{\gamma s} WV \quad (8)$$

Q : 항로 기본교통용량(척/시)

γ : 점유영역의 장직경(Km)

s : 점유영역의 단직경(Km)

W : 항로폭(Km)

V : 선속(Km/h)

실제로는 해상 및 기상 상태, 선박 항행의 자유성, 해상교통관리 방식 등에 따른 선박 운항 제한 등에 의해 실제 통항 가능 척수는 이보다 훨씬 작아지며, 이처럼 실제 가능한 교통량을 실용교통용량이라고 한다. 이러한 Q_p (실용교통용량 값)은, 별도의 교통관리가 없는 경우 Q (기본교통용량)의 20%로 가정하는 것이 일반적이나, 해역에 따라 다르게 적용하기도 한다.

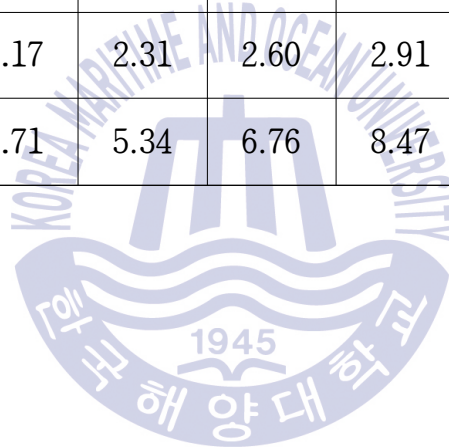
또한 실제 대상해역에는 크기가 다양한 선박들이 혼재되어 운항하기 때문에 실용교통량(항로가 수용할 수 있는 최대교통량)을 평가하기 위해서는 Table 2와 같이 표준 선박을 설정한 후, 이 표준 선박이 시간당 몇 척씩 통과할 수 있는지를 계산하여 평가하는 것이 편리하며, 본 연구에서는 2003년 우리나라 전국 항만에 입항한 선박의 평균 길이인 전장 82m의 선박을 표준 선박으로 설정하였다.

선박의 안전운항에 필요한 해역의 면적은 보통 선박 길이의 제곱(L^2)에 비례하기 때문에 이를 이용하여 항로의 교통용량을 평가하였다. 여기서 L^2 환산계수는 표준선박과의 길이의 비를 나타내는 L 환산계수의 제곱 값을 나타낸다.

해상교통혼잡도는 항로수용능력대비 해상교통량을 수치화한 것으로 비교적 간단하게 계산하여 특정 시간의 항로의 혼잡한 상황의 파악이 가능하다는 특징은 있으나, 모든 선박의 특성 및 운동성능, 항로의 환경 등을 표준화하여 각각의 특성을 폭넓게 반영할 수 없다는 단점이 존재한다. 그리고 동시에 조우 또는 교차하는 상황이나 해역의 통항패턴 등을 반영할 수 없다는 한계가 있다.

Table 2 Length and conversion Factor of Korea port of entry Ship(2003)

총톤수(GT)	100 미만	100~ 500	500~ 1K	1K~ 3K	3K~ 5K	5K~ 7K	7K~ 10K	10K~ 15K
대표길이(m)	39.7	52.2	58.4	76.5	100.5	114.2	127.4	146.4
L 환산계수	0.48	0.64	0.71	0.93	1.23	1.39	1.55	1.79
L^2 환산계수	0.23	0.41	0.50	0.86	1.51	1.93	2.40	3.20
총톤수(GT)	15K~ 20K	20K~ 25K	25K~ 30K	30K~ 50K	50K~ 60K	60K~ 75K	75K~ 100K	100K 이상
대표길이(m)	162.2	177.9	189.4	213.1	238.3	258.0	276.0	322.1
L 환산계수	1.98	2.17	2.31	2.60	2.91	3.15	3.37	3.93
L^2 환산계수	3.92	4.71	5.34	6.76	8.47	9.92	11.36	15.44



2.3 IWRAP Mk2 및 해상교통혼잡도 특성 비교

IWRAP Mk2는 충돌 및 좌초 등 사고가 발생할 확률을 기반으로 위험성을 평가하는 모델로 AIS Data를 이용하면 실제 통항선박의 제원과 선속의 입력이 가능하고, 선박의 조종성능을 고려한 기하학적 충돌확률(Geometrical Probability)을 산출할 수 있다. 또한 항로폭, 수심, 기타 환경적인 요인을 실제 해역과 동일하게 설정할 수 있다.

IWRAP Mk2에서는 사고 회피에 실패할 확률을 인과확률(Causation Probability)에서 찾고자 하며, 사고 발생확률은 기하학적 충돌확률(Geometrical Probability)과 인과확률(Causation Probability)이 동시에 일어날 경우로 정의하고 있다.

이처럼 실제 통항선박의 Data를 이용할 수 있고, 환경 및 공간적인 측면을 다양하게 고려하여 계산하기 때문에 IWRAP Mk2는 다변화, 다양성, 탄력성이 있는 Dynamic한 모델로 판단되지만, 해당 프로그램을 이용하기 위해서는 라이선스를 구매하여야 하며, 초기 입력이 다소 복잡하다는 특징이 있다.

해상교통혼잡도(Marine Traffic Congestion)는 항로의 수용능력 대비 실제 해상교통량을 백분율로 간단히 나타내는 모델로 실제 통항선박을 하나의 표준선박으로 표준화시키고, 선박의 점유영역(Ship's Domain) 개념을 사용하여 특정시간의 혼잡도 또는 평균혼잡도를 측정한다.

해상교통혼잡도에서는 대부분의 data를 표준화하여 평균값으로 계산하기 때문에 표준화, 획일성, 단일성이 있는 Static한 모델로 판단되며, 비교적 계산이 간단하며, 단순하다는 특징이 있다.

Table 3과 같이 두개의 모델 모두 공통적으로 입력되는 변수는 존재하지만, 각 변수의 처리과정 또는 계산방법의 차이가 존재하며, 이에 본 연구에서는 두개의 모델이 상호 연관성이 있는지 분석하고자 하였다.

Table 3 Feature comparison of IWRAP Mk2 and Marine Traffic Congestion

Kind	IWRAP Mk2	Marine Traffic Congestion
Fairway	<ul style="list-style-type: none"> • 항로폭 • 항로수심 • 항로길이 	<ul style="list-style-type: none"> • 최소 항로폭
Speed	<ul style="list-style-type: none"> • 실제 통항 선속 	<ul style="list-style-type: none"> • 평균 선속
Ship' s particular	<ul style="list-style-type: none"> • 선박길이, 폭 • 선박흘수 	<ul style="list-style-type: none"> • 표준선박의 점유영역
Traffic Quantity	<ul style="list-style-type: none"> • 통항선박 교통량 	<ul style="list-style-type: none"> • 통항선박 교통량
Environment	<ul style="list-style-type: none"> • 교각 또는 구조물 • 장애요소 	-
Etc	<ul style="list-style-type: none"> • Causation Probability 	-
Output	<ul style="list-style-type: none"> • 충돌확률(선종별) • Head-on, Overtaking • Crossing, Merging • Bend, Area 등 • 좌초확률 • Density • Lateral Distribution 	<ul style="list-style-type: none"> • 평균 혼잡도 • 시간대별 혼잡도 • 피크타임 혼잡도

2.4 기타 해상교통안전성 평가모델

2.4.1 PAWSA

PAWSA는 미국연안경비대(USCG)의 Port And Waterway Safety Assessment라는 평가모델로 대상해역을 잘 아는 수로이용자 및 이해당사자와 같은 전문가들이 그룹을 형성하여 위험도를 식별하고 평가하는 정성적인 평가모델이다.[10]

PAWSA는 계층분석법(Analytical Hierarchy Process, AHP)을 사용한 평가모델로 5단계의 평가과정을 거치며 6개의 Risk Model 항목을 기준으로 평가한다. PAWSA는 해역이용자들이 참여하여 실질적인 위해요소를 식별하고 평가할 수 있는 정성적인 모델이지만, 평가결과에 따른 객관성을 담보하기 어렵다는 단점이 존재한다.

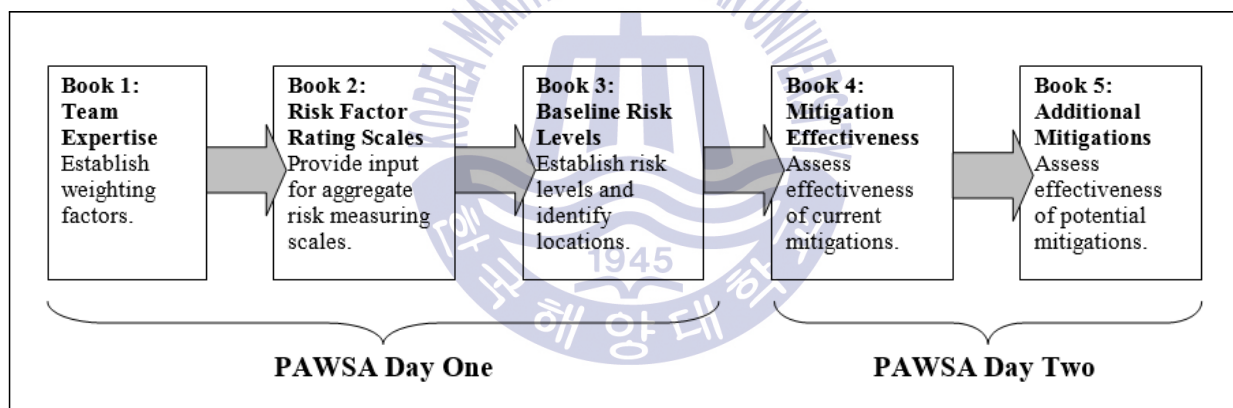


Fig. 8 Five main steps used in the PAWSA

2.4.2 FSA

FSA(Formal Safety Assessment)는 IMO의 공식 안전성 평가모델로, 선박운항과 관련된 위험을 평가하고 위험을 줄임으로서 비용과 편익을 평가할 수 있는 체계적인 프로세스이다. FSA의 방법론은 위험요소 식별, 위험도 분석, 위험 관리, 비용·편익 분석 다섯 가지의 단계로 구성되며, 위해요소와 비용·편익이 함께 고려되어 다각적으로 평가가 가능하다.[11]

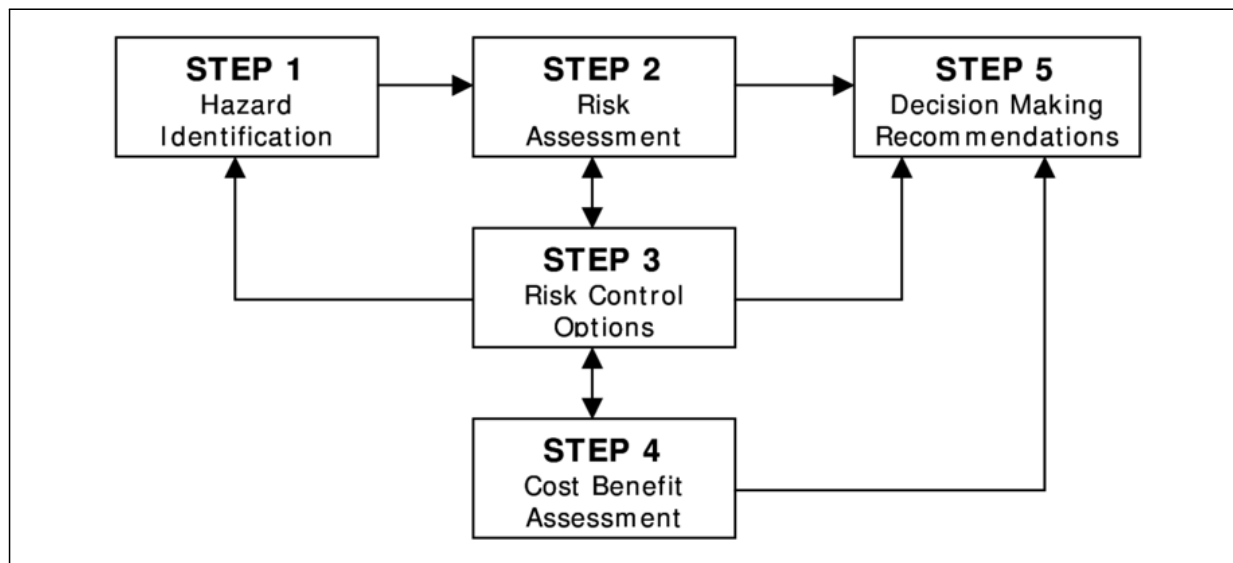


Fig. 9 Flow chart of the FSA process

2.4.3 Gas Model

Gas Model은 가스 분자의 충돌 예상 빈도를 위해 개발된 모델로, 가스 분자가 기하학적 충돌 반경에 상대 속도로 계산된 위험영역에 존재한다면 충돌 위험이 있다고 해석한다. Gas 모델을 해상교통에 적용할 경우, 선박의 상대속도 및 상대각도, 위험 범위를 위한 선박의 기하학적 충돌 반경, 시간 등이 입력요소로 계산되어 지며, 평가대상 해역을 다수의 셀로 나누어 각 셀당 위험도를 측정할 수 있다.[12]

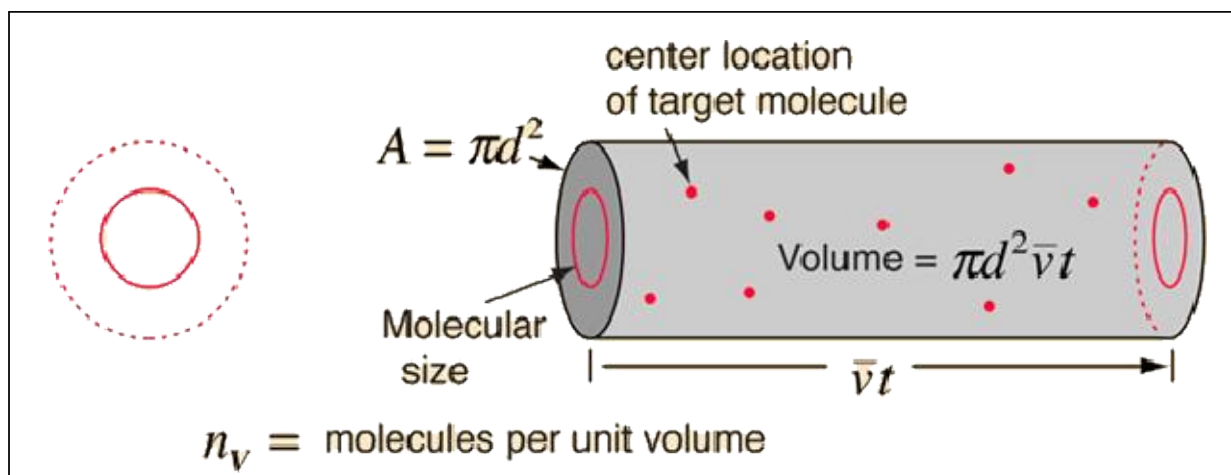


Fig. 10 Gas Model

2.4.4 PARK Model

PARK(Potential Assessment of Risk, a Korean Model that is being develop) 모델은 선박운항자를 대상으로 운항 중 처해 있는 상황에 대하여 주관적 평가에 의한 설문조사를 시행하고, 분산분석 및 다중비교 분석을 수행하는 모델이다. 선박의 형태, 톤수, 길이, 폭, 승선경력, 소지 면허, 직책 등을 구분하여 회귀분석방법을 통해 해상교통위험도를 측정한다.[13]

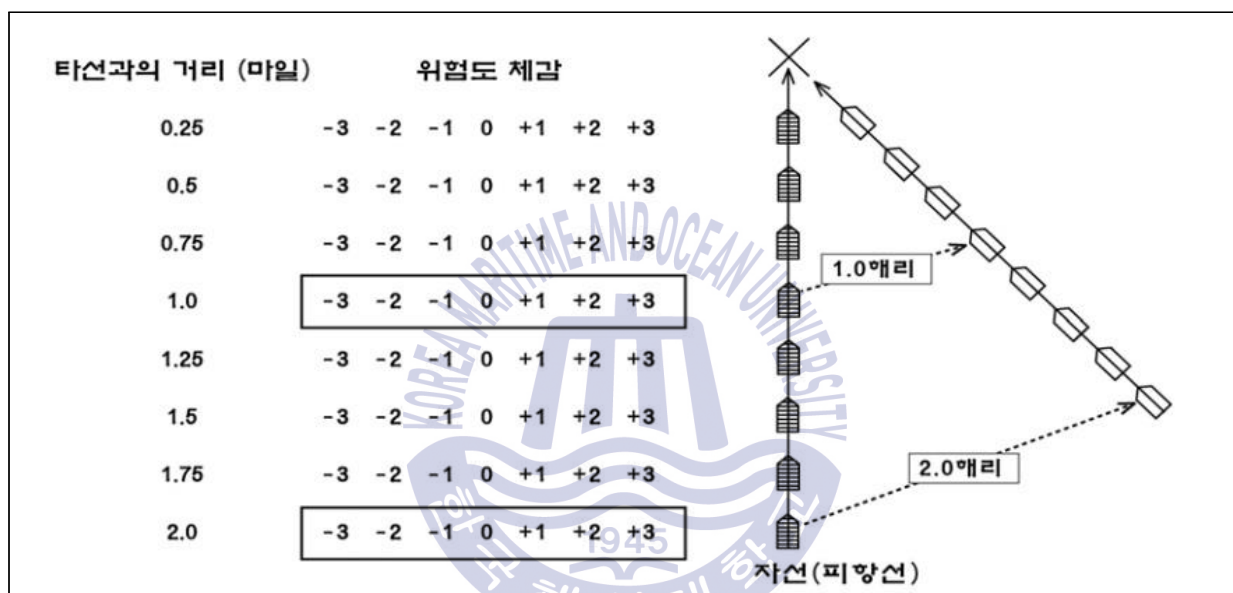


Fig. 11 Risk evaluation of PARK Model

2.4.5 NURI Model

NURI(Numeric Risk Assessment) 모델은 위해도를 사고가능성 및 이로 인한 영향의 곱으로 표현하는 가장 보편적인 정의를 따르는 모델로, 위험요소별 가중치를 이용하여 통합적인 위험도를 계산한다.

NURI 모델은 국내 해상교통환경에 적합한 위해도 평가모델을 구성하기 위해 대표적인 위험요소를 분류하고 가중치를 산정하여 위험도를 평가한 모델로 정성적인 위험도 평가를 정량적으로 대체한 평가모델이다.[14]

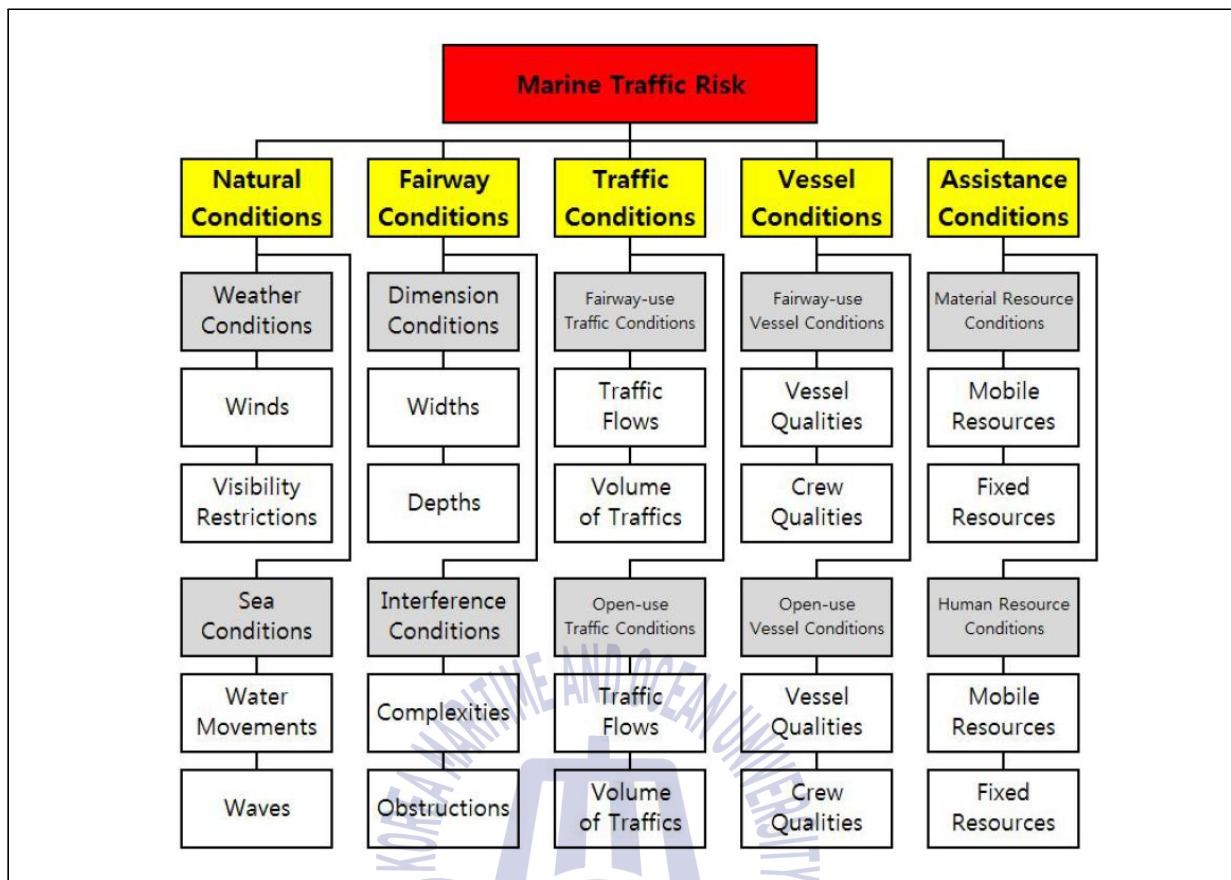


Fig. 12 Risk factor sorting of NURI model

제 3 장 IWRAP Mk2 기반 항로 위험도

3.1 대상 항로 설정 및 기본사항 입력

대상 항로의 경우, 해도 및 실제교통량을 참고하여 대상 항만에 진입하기 위한 항로중 가장 통항량이 많고 항로폭이 협소한 곳을 우선적으로 설정하였으며, 인천항 6개 항로, 울산항 6개 항로, 평택·당진항 2개 항로, 부산항 5개 항로, 부산항신항 3개 항로, 대산항 4개 항로 등 총 26개의 항로를 분석하였다.

본 연구에서는 가급적 실제 통항패턴을 반영하여 분석하고자 실무를 수행하며 수집하거나, 연구를 목적으로 요청한 해양수산부의 GICOMS Data(AIS) 및 각 항만을 관할하는 지방해양수산청의 Port-MIS(선박입출항신고)를 활용하였다.[15]

3.1.1 Leg 지정

Leg 지정은 IWRAP Mk2를 사용하여 충돌 및 좌초 확률을 산출하기 위한 가장 기초적인 단계로, 실제 선박이 통항하는 항로를 정의해 주는 것이다. Leg 지정 후, 항로폭 및 기본적인 사항들을 입력해주고, 각 Leg별 통항 선박의 길이별, 선종별에 따른 통항량을 입력할 수 있다. 또한 Leg를 통항하는 선박의 통항 형태에 따라 분포값(정규분포, 로그정규분포, 균등분포 등)을 입력할 수 있다.

본 연구에서는 대상 항로 중 항로폭, 교통량, 척수 및 통항패턴의 변화가 민감한 부분을 Leg로 설정하였으며, Leg별 특성은 다음과 같다.

3.1.1.1 인천항

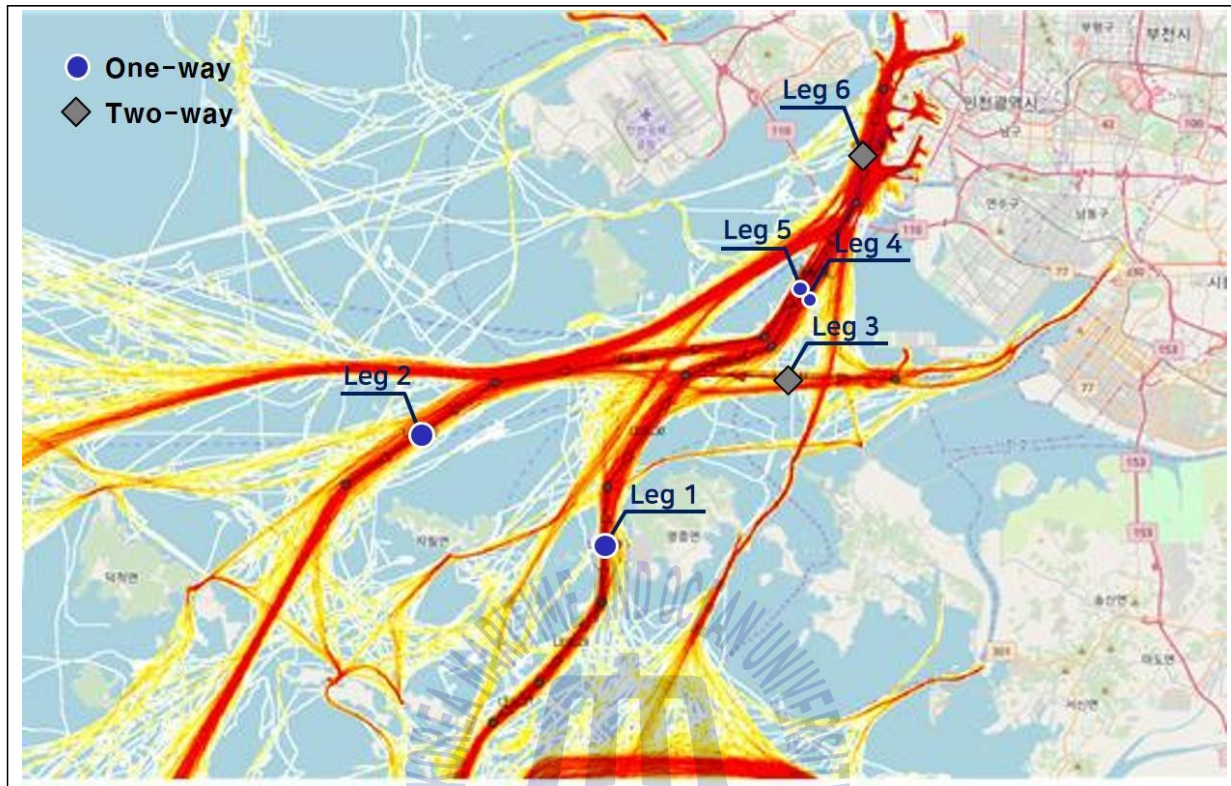


Fig. 13 Setting the leg - Incheon

Table 4 Characteristics of Leg - Incheon

Leg	항 로	항로폭(m)	일평균척수	통항형태
Leg 1	동수도	926.0	40	One-way
Leg 2	서수도	926.0	41	One-way
Leg 3	3항로	833.0	27	Two-way
Leg 4	1항로-입항	426.0	38	One-way
Leg 5	1항로-출항	482.0	52	One-way
Leg 6	인천대교	625.5	133	Two-way

3.1.1.2 울산항

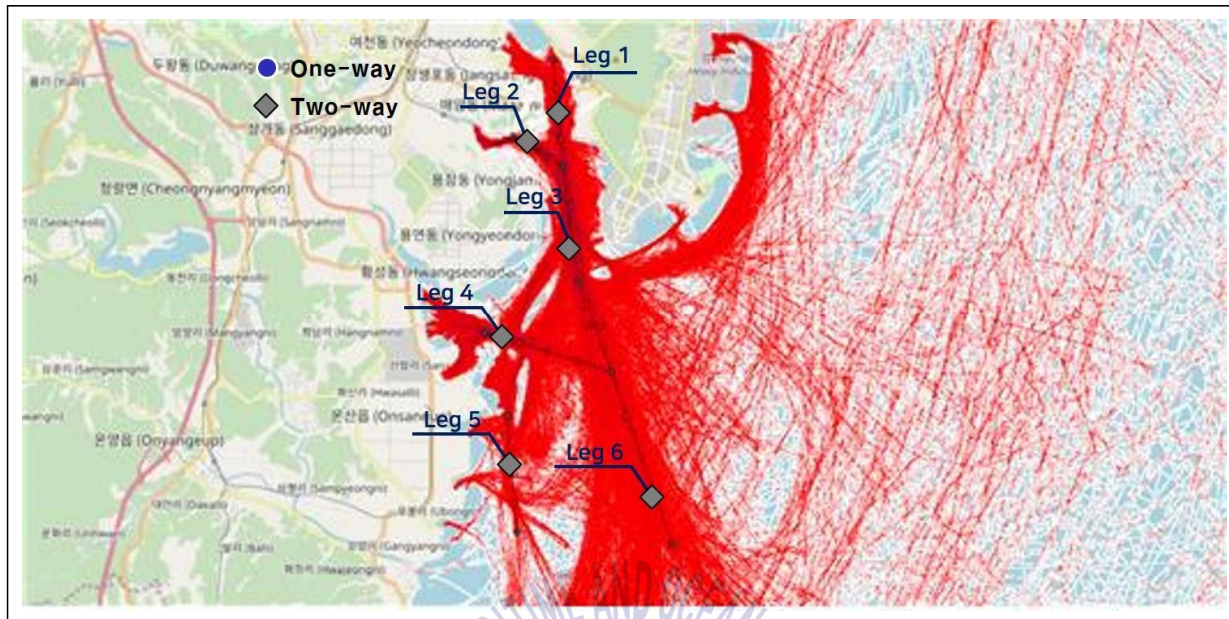


Fig. 14 Setting the leg - Ulsan

Table 5 Characteristics of Leg - Ulsan

Leg	항로	항로폭(m)	일평균척수	통항형태
Leg 1	제1항로	320.0	132	Two-way
Leg 2	제2항로	300.0	156	Two-way
Leg 3	제1,2항로	420.0	218	Two-way
Leg 4	제3항로	380.0	119	Two-way
Leg 5	제4항로	370.0	42	Two-way
Leg 6	울산진입항로	550.0	75	Two-way

3.1.1.3 평택 · 당진항



Fig. 15 Setting the leg - Pyongteak · Dangjin

Table 6 Characteristics of Leg - Pyongteak · Dangjin

Leg	항로	항로폭(m)	일평균척수	통항형태
Leg 1	진입항로	1,168.0	61	Two-way
Leg 2	서부두 시점	711.0	21	Two-way

3.1.1.4 부산항

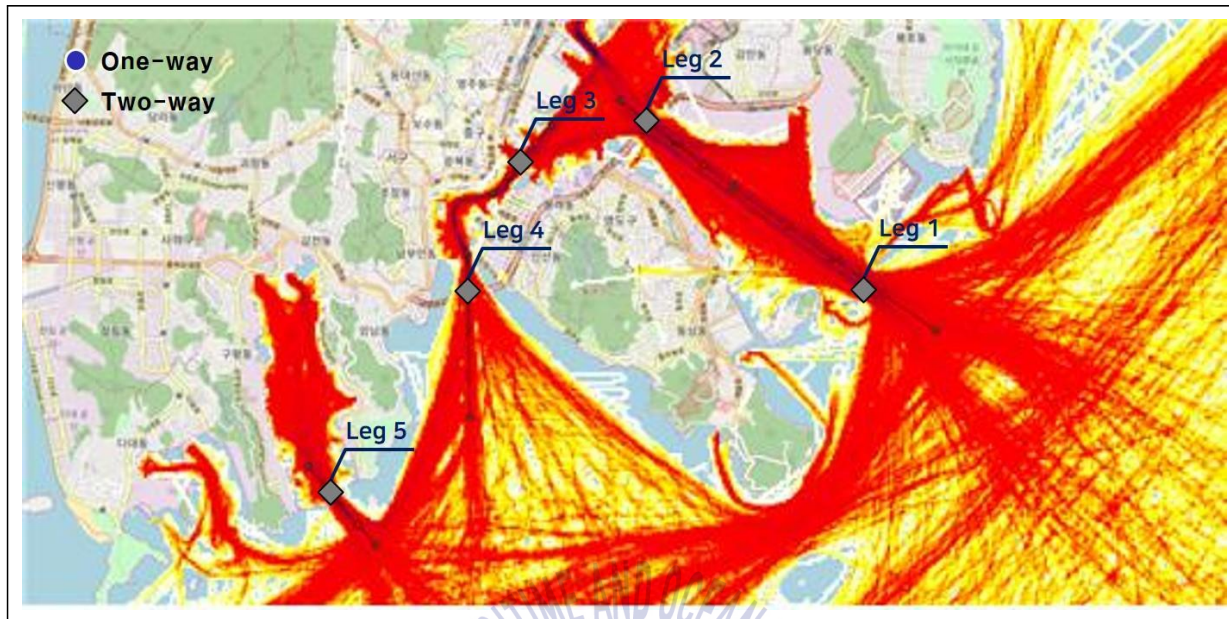


Fig. 16 Setting the leg - Busan

Table 7 Characteristics of Leg - Busan

Leg	항 로	항로폭(m)	일평균척수	통항형태
Leg 1	조도방과제	340.0	148	Two-way
Leg 2	부산항대교	340.0	202	Two-way
Leg 3	부산대교	56.0	15	Two-way
Leg 4	남항대교	185.0	76	Two-way
Leg 5	감천항방과제	270.0	109	Two-way

3.1.1.5 부산항신항

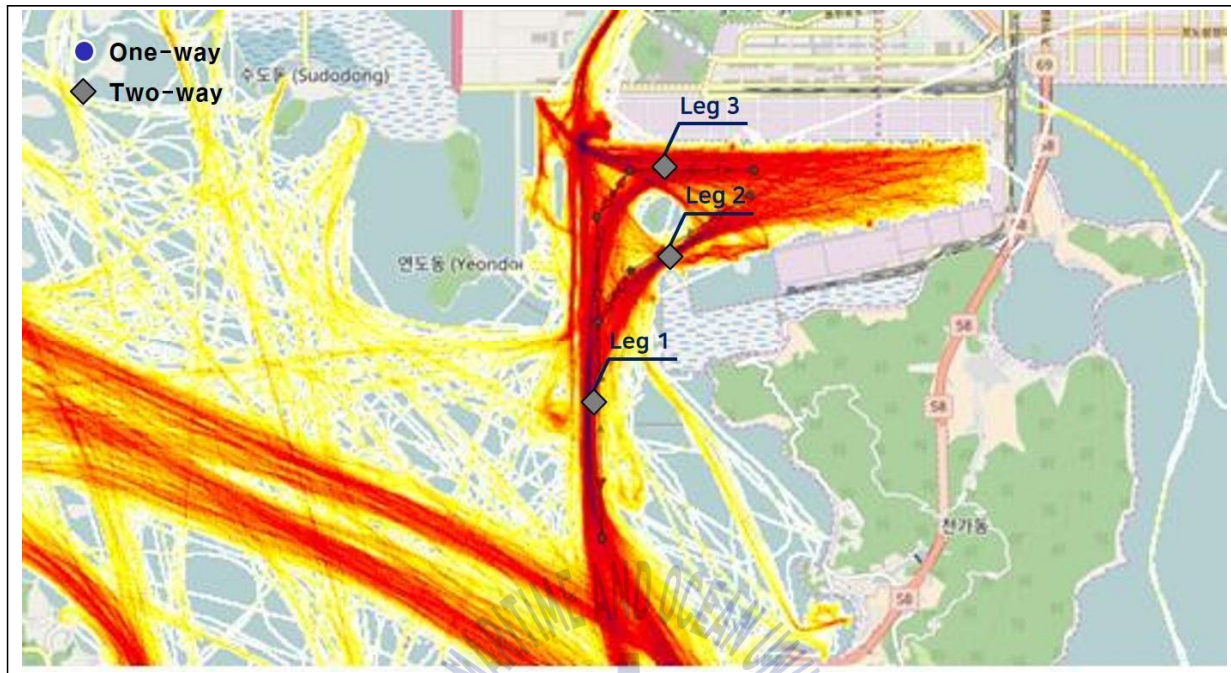


Fig. 17 Setting the leg - Busan New Port

Table 8 Characteristics of Leg - Busan New Port

Leg	항로	항로폭(m)	일평균척수	통항형태
Leg 1	동방과제	570.0	127	Two-way
Leg 2	토도남측	200.0	61	Two-way
Leg 3	토도북측	500.0	145	Two-way

3.1.1.6 대산항

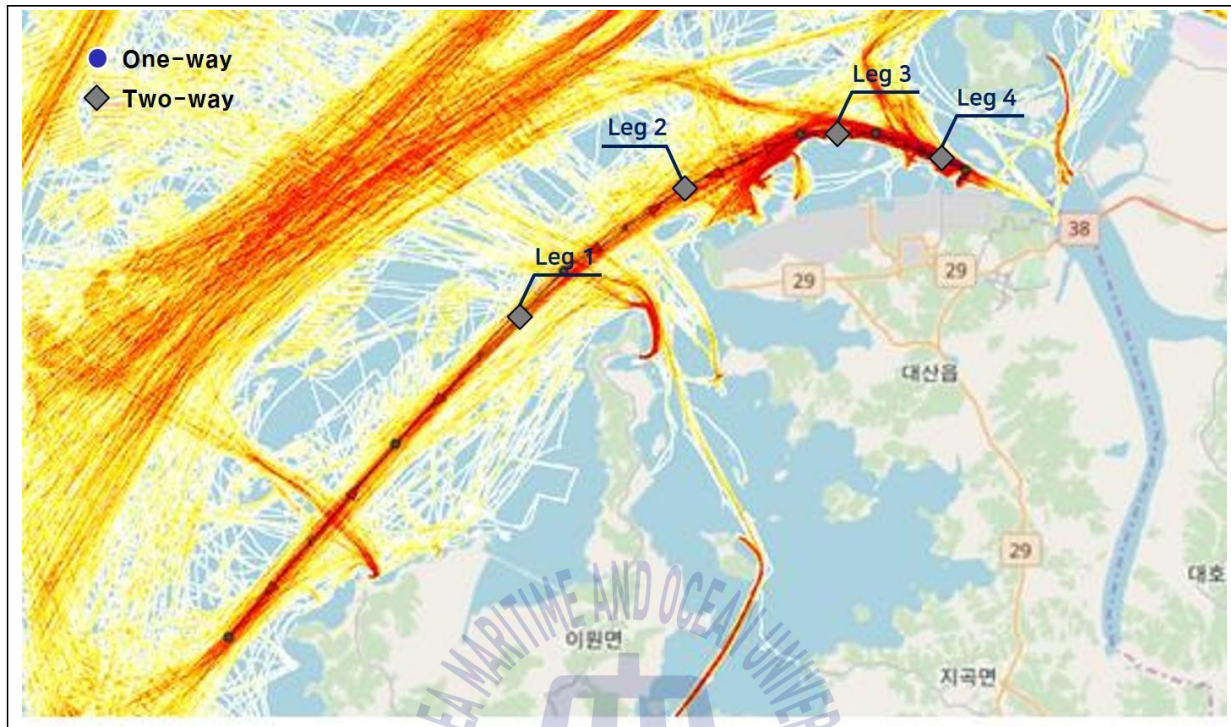


Fig. 18 Setting the leg - Deasan

Table 9 Characteristics of Leg - Deasan

Leg	항 로	항로폭(m)	일평균척수	통항형태
Leg 1	대산항 항계선	1,010.0	24	Two-way
Leg 2	제1항로	1,280.0	37	Two-way
Leg 3	흑어도 북측	270.0	16	Two-way
Leg 4	비경도 서측	350.0	62	Two-way

3.1.2 인과확률 입력

IWRAP Mk2에서 계산하는 기본적인 선박의 충돌 및 좌초확률은 2개의 독립된 사건인 기하학적 충돌확률(Geometrical Probability)과 인과확률(Causation Probability)이 동시에 일어나는 것으로 산출하며, 이 인과확률(Causation Probability)을 위한 인과요소(Causation factor)를 설정하는 것이 가능하다.

인과요소(Causation Factors)의 경우, 최종 결과물인 충돌확률을 산출하는데 중요한 요소이므로 IWRAP Mk2에서는 평가하고자 하는 해역의 적절한 인과요소(Causation Factors)를 설정하도록 권고하고 있다.[16]

본 연구에서는 2.1.2절에 언급한바와 같이, IWRAP Mk2에서 채택하고 있는 Global Value(Default) 값을 그대로 적용하였으며, 향후 국내 항로에 적합한 값의 검증 및 수정이 필요할 것으로 판단된다.

Table 10 Causation Probability value applied in This Study(Global value)

Condition	Causation factor
Head on Collisions	$0.5 * 10^{-4}$
Overtaking Collisions	$1.1 * 10^{-4}$
Crossing Collisions	$1.3 * 10^{-4}$
Collisions in bend	$1.3 * 10^{-4}$
Collisions in merging	$1.3 * 10^{-4}$
Grounding - forget to turn	$1.6 * 10^{-4}$

3.1.3 교통량 입력

교통량 입력의 경우, 평가 대상 항로의 실제 선박통항량 및 통항특성 등을 반영하기 위하여, 2014~2016년에 수집된 GICOMS Data 및 각 항만을 관할하는 지방해양수산청의 Port-MIS(선박입출항신고)를 활용하였다.

또한 결과의 신뢰성 향상을 위해 최대 3개월 이상의 통항량을 검토하여 기상 특보 일을 제외한 가장 교통량이 많고, 편차가 적은 연속된 5일을 선별하여 교

통량을 입력하였다.

IWRAP Mk2에서는 입력된 교통량을 바탕으로 연간 통항척수를 자동으로 산출할 수 있으며, 사용자에게 의하여 특정선박 또는 선종 등에 Factor를 조절할 수 있다. 본 연구에서는 선박의 실제 통항 항적이 반영된 GICOMS Data를 활용하였기 때문에 Factor에 따른 통항척수 조절은 고려하지 않았다.

Table 11 Input date by trade port

구 분	일 자	계 절
인천항	2014.01.23.~01.27.	겨 울
울산항	2014.02.20.~02.24.	겨 울
평택·당진항	2016.06.20.~06.24	여 름
대산항	2015.11.09.~11.13.	가 을
부산항(부산항신항포함)	2016.12.05.~12.09	겨 울

3.2 IWRAP Mk2에 의한 항로 위험도 분석

3.1절에서 입력한 data로 IWRAP Mk2에 의하여 분석된 항로 위험도 및 선종별 통항 척수를 분석하였다.

대상 항로 대부분은 해당 항만을 이용하고자 하는 선박이 통항하기 위한 필요 수심이 확보되어 있으며, 선박은 항로의 수심에 따라 입출항 흘수를 조절하여 입출항 하게 된다. 따라서 항로상에 장애물이 있는 경우를 제외하고는 좌초가 될 확률은 극히 드물기 때문에 좌초확률에 대한 값은 배제하고, 항로상 충돌확률에 대해서만 고려하였다.

또한, 대상 항로의 경우, 부두로 진입하기 위한 직선항로가 대부분이며, 이러한 직선항로에서는 ‘선박의 입항 및 출항 등에 관한 법률’ [17] 준수 및 해상교통관제센터의 통항관제 등으로 선박간의 횡단 상황이 드물기 때문에 본 연구에서는 횡단 상황에 대한 충돌확률은 제외하고 마주치는 상황 및 추월상황에 대해서만 고려하였다.

3.2.1 인천항

인천항은 동수도, 서수도, 3항로, 1항로(입항, 출항) 인천대교 등 총 6개의 항로에서 IWRAP Mk2에 의한 항로 위험도를 평가하였다.

통항선박의 경우, 대부분의 항로에서 100m 미만의 일반화물선이 가장 많은 것으로 분석되었으며, 3항로의 경우, LNG터미널을 입출항하는 대형 LNG선박도 다수 통항하는 것으로 조사되었다.

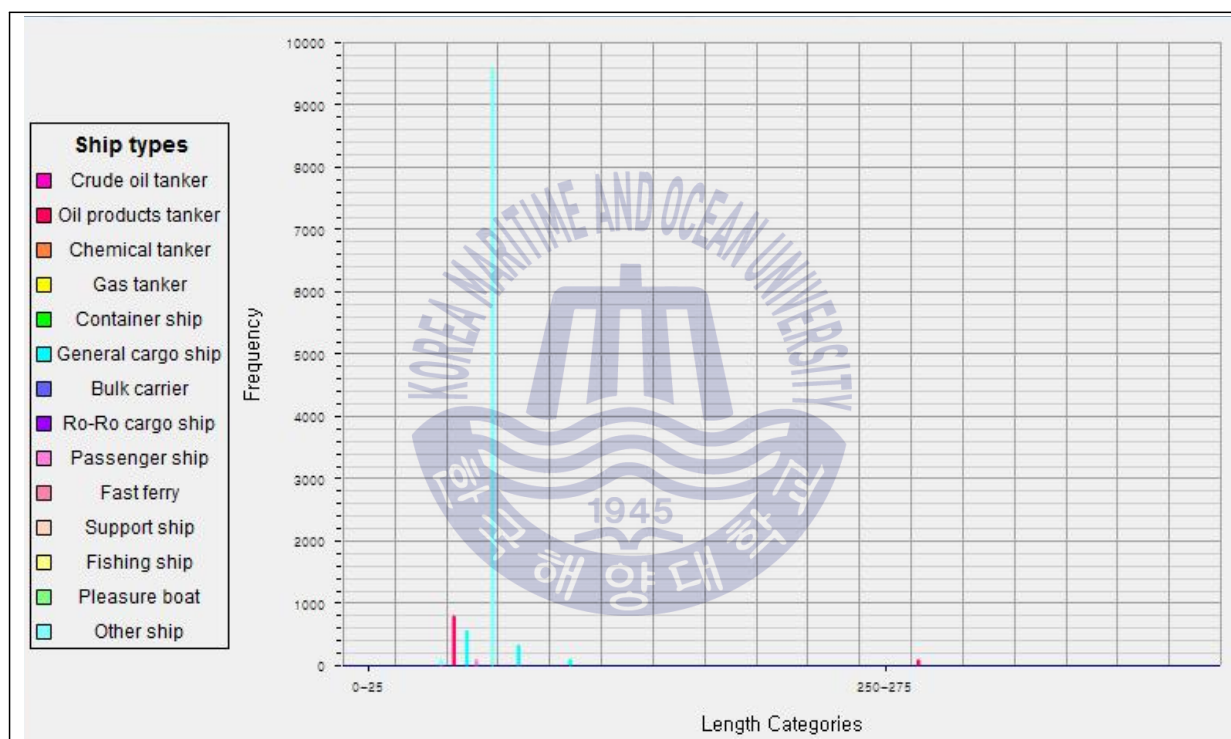


Fig. 19 Traffic Volume Distribution chart - Incheon 동수도

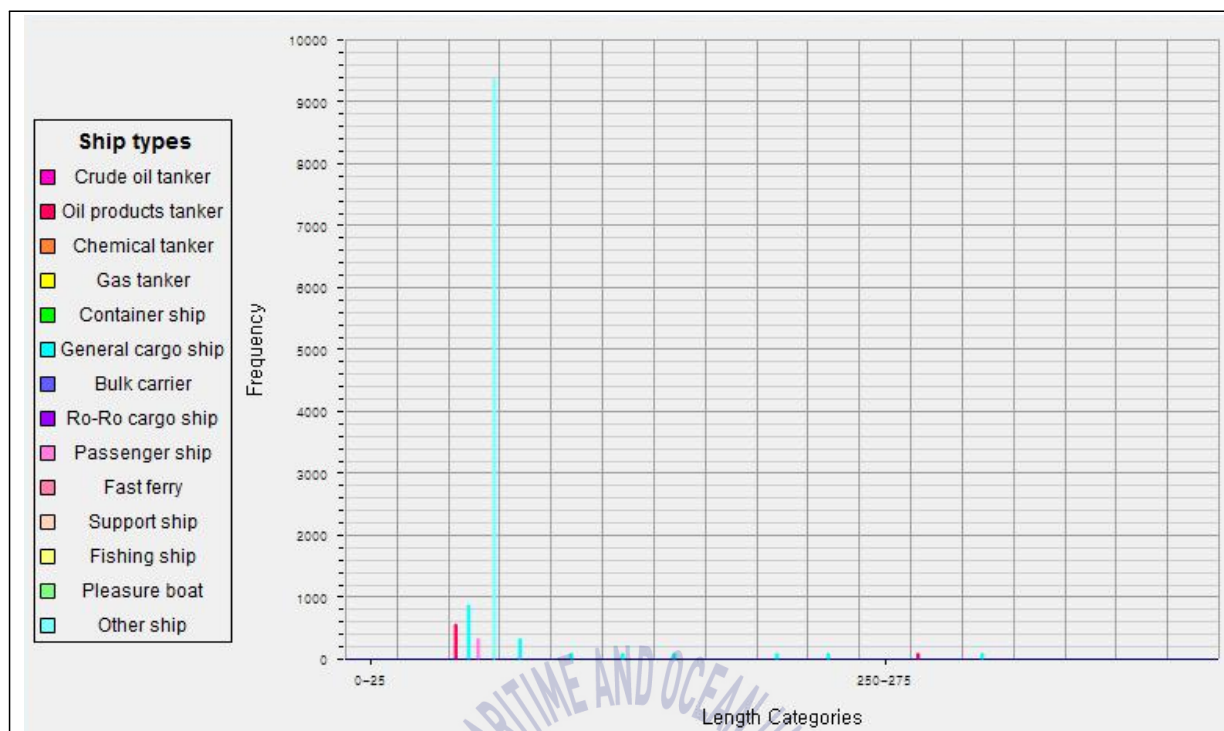


Fig. 20 Traffic Volume Distribution chart - Incheon 서수도

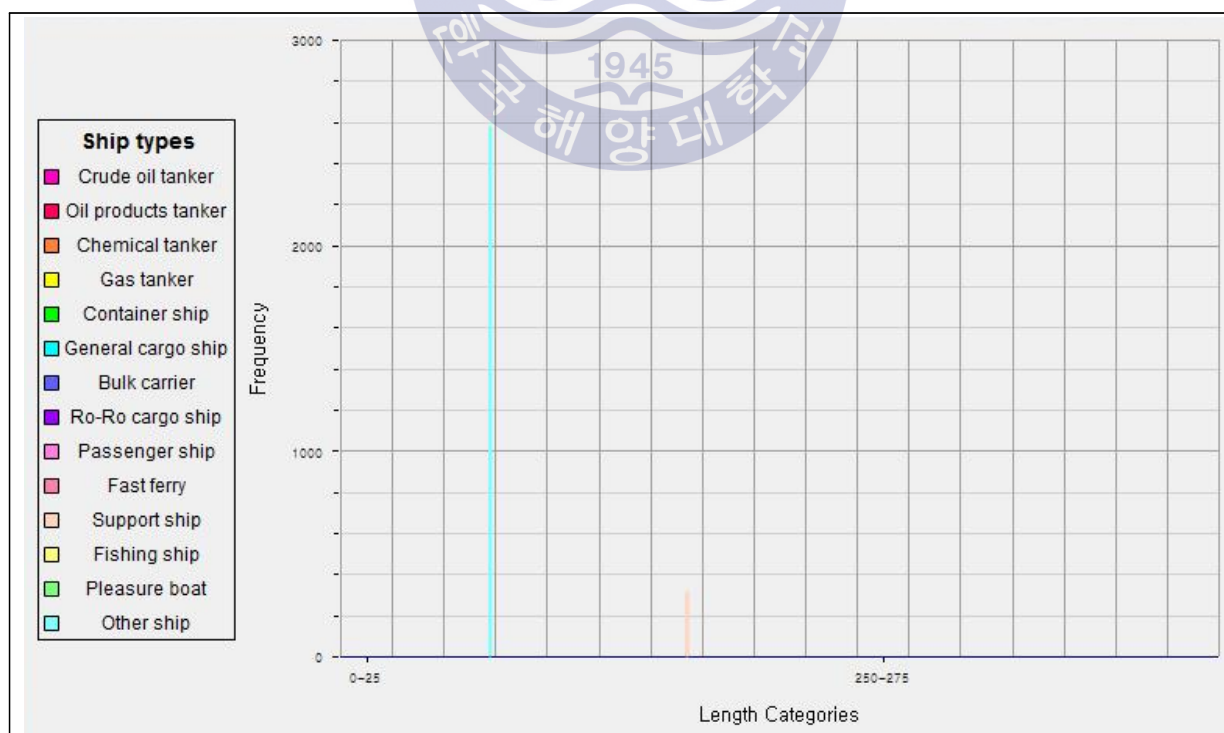


Fig. 21 Trafic Volume Distribution chart - Incheon 3항로(West bound)

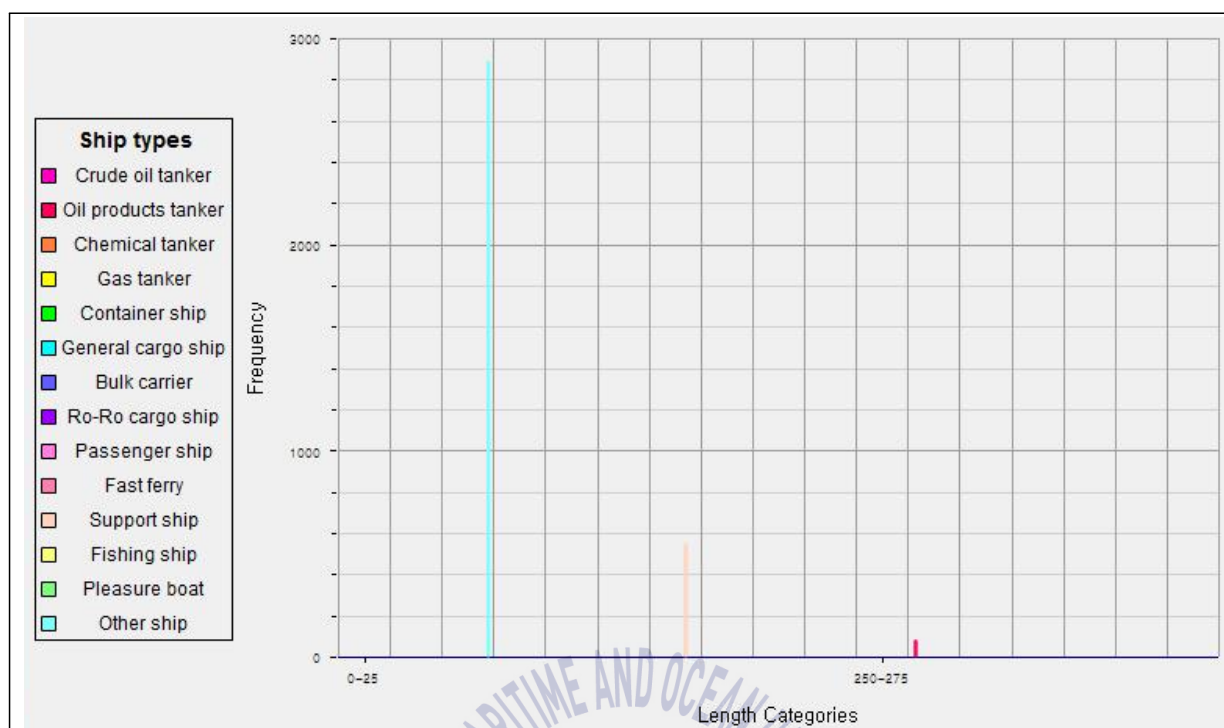


Fig. 22 Trafic Volume Distribution chart - Incheon 3항로(East bound)

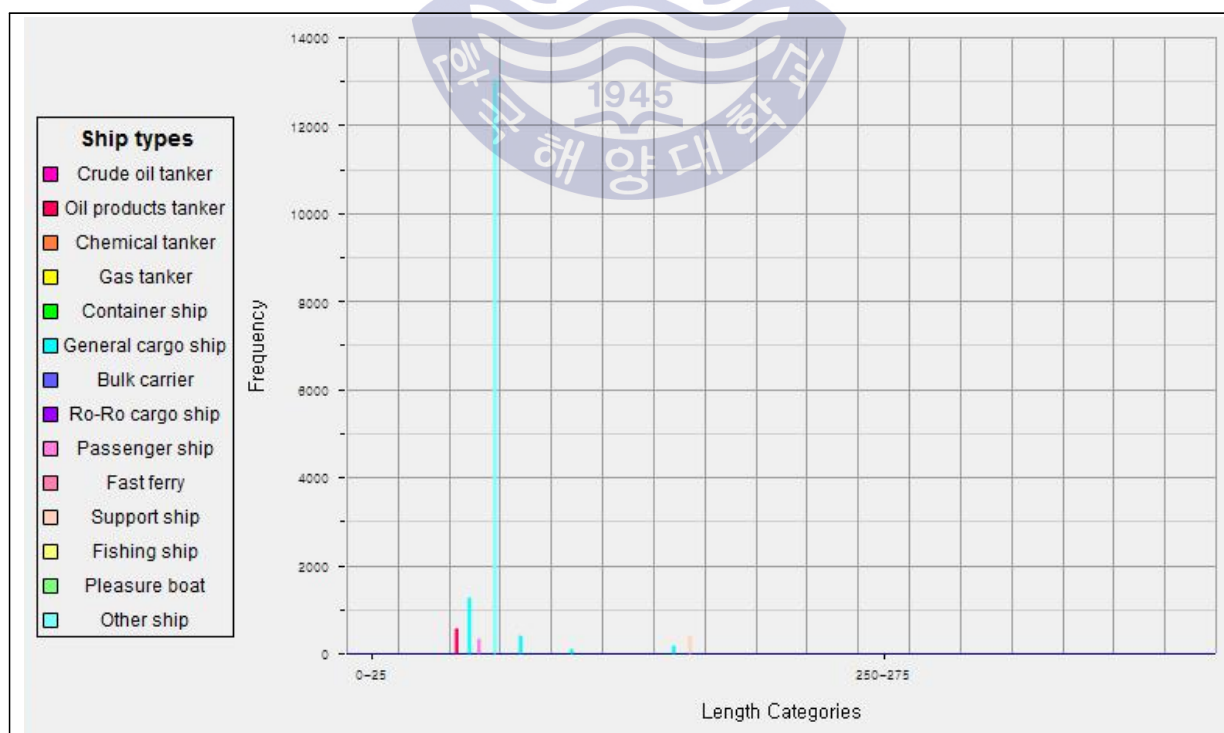


Fig. 23 Traffic Volume Distribution chart - Incheon 1항로 입항

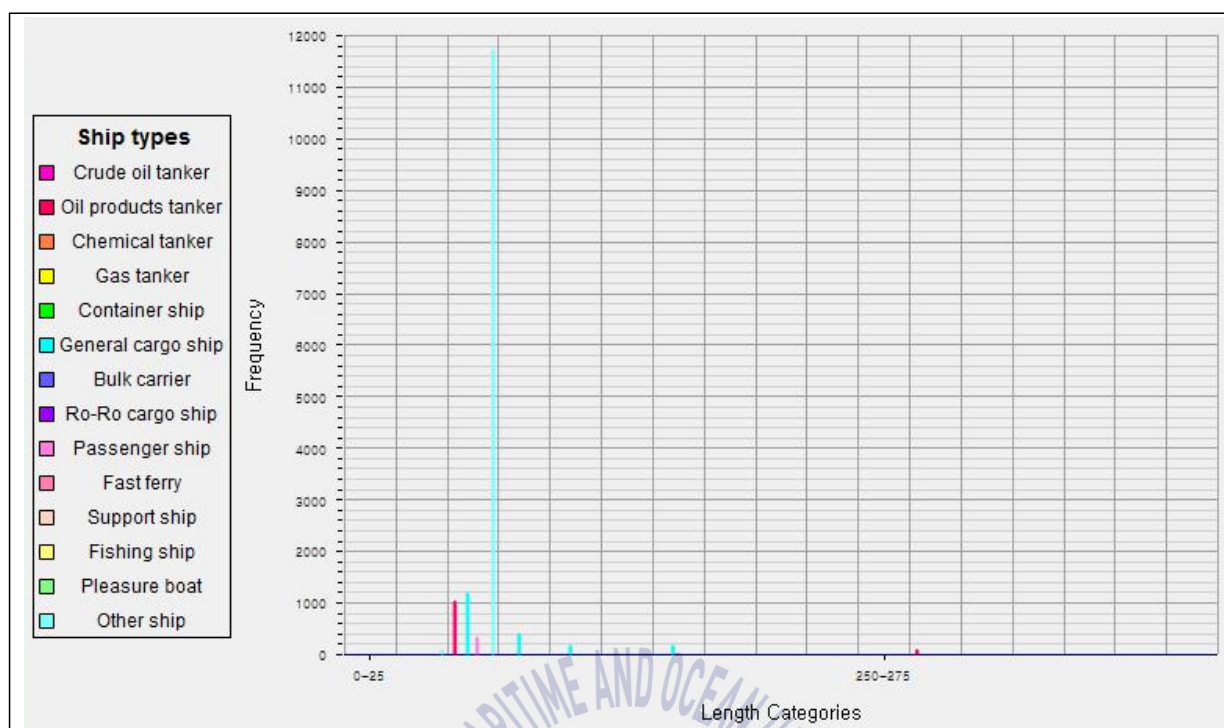


Fig. 24 Traffic Volume Distribution chart - Incheon 1항로 출항

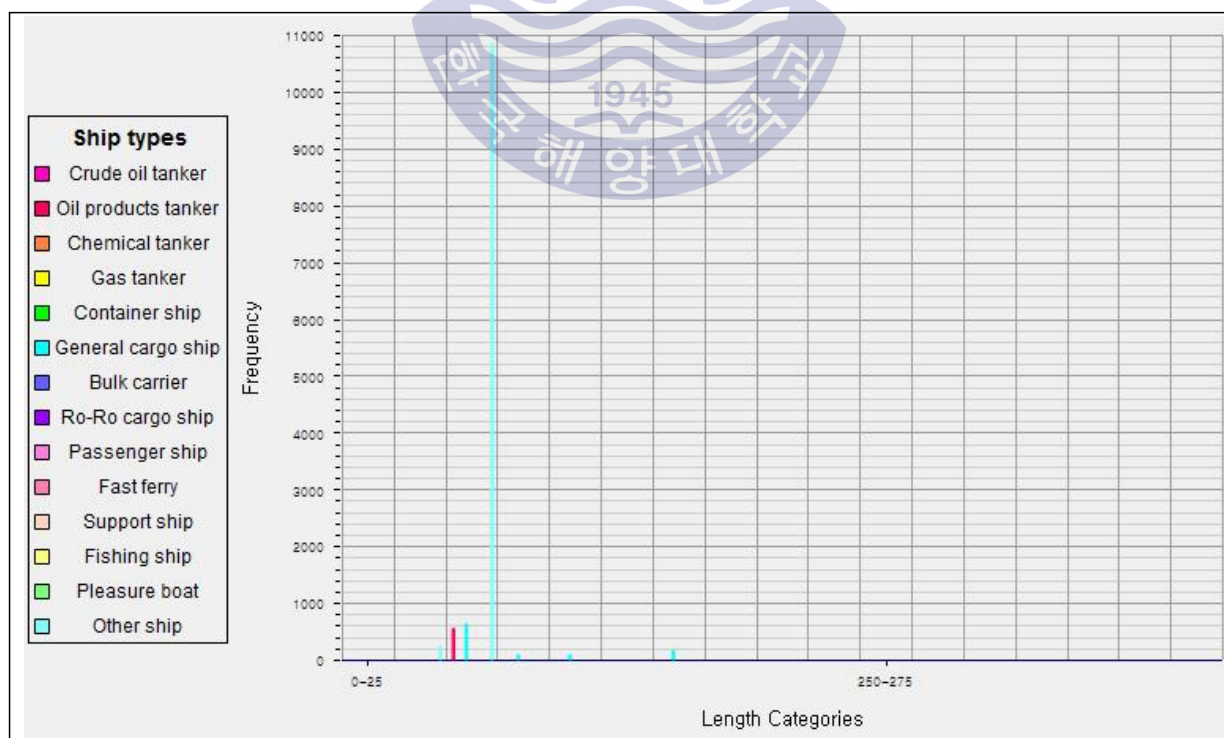


Fig. 25 Traffic Volume Distribution chart - Incheon 인천대교(North bound)

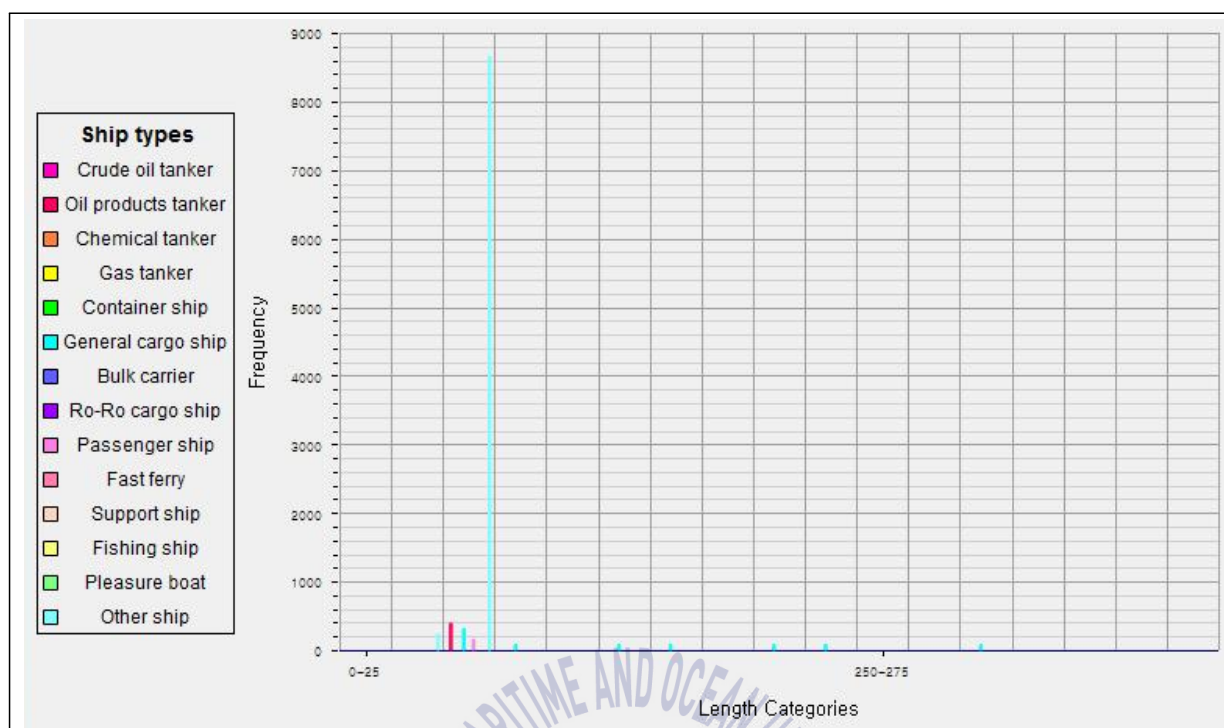


Fig. 26 Traffic Volume Distribution chart - Incheon 인천대교(South bound)

인천항 항만진입수로 충돌확률은 Table 12와 같이 분석되었으며, 인천대교에서의 충돌확률이 가장 높은 것으로 검토되었다. 해당 항로의 일평균 척수가 약 133척으로 타 항로보다 높으며, 선박이 교량 밑으로 통행할 경우, 교각으로 인한 표준분포가 좁게 형성되어 충돌확률이 높은 것으로 분석되었다.

Table 12 Collision probability - Incheon

구 분	일평균척수	Head-on	Overtaking	λ_{Col}
동수도	40	0.00017	0.00043	0.00159
서수도	41	0.00157	0.00032	0.00220
제3항로	27	0.00120	0.00020	0.00141
제1항로(입항)	38	0.01324	0.00147	0.00829
제1항로(출항)	52	0.01324	0.00147	0.00274
인천대교	133	0.01038	0.00030	0.01339

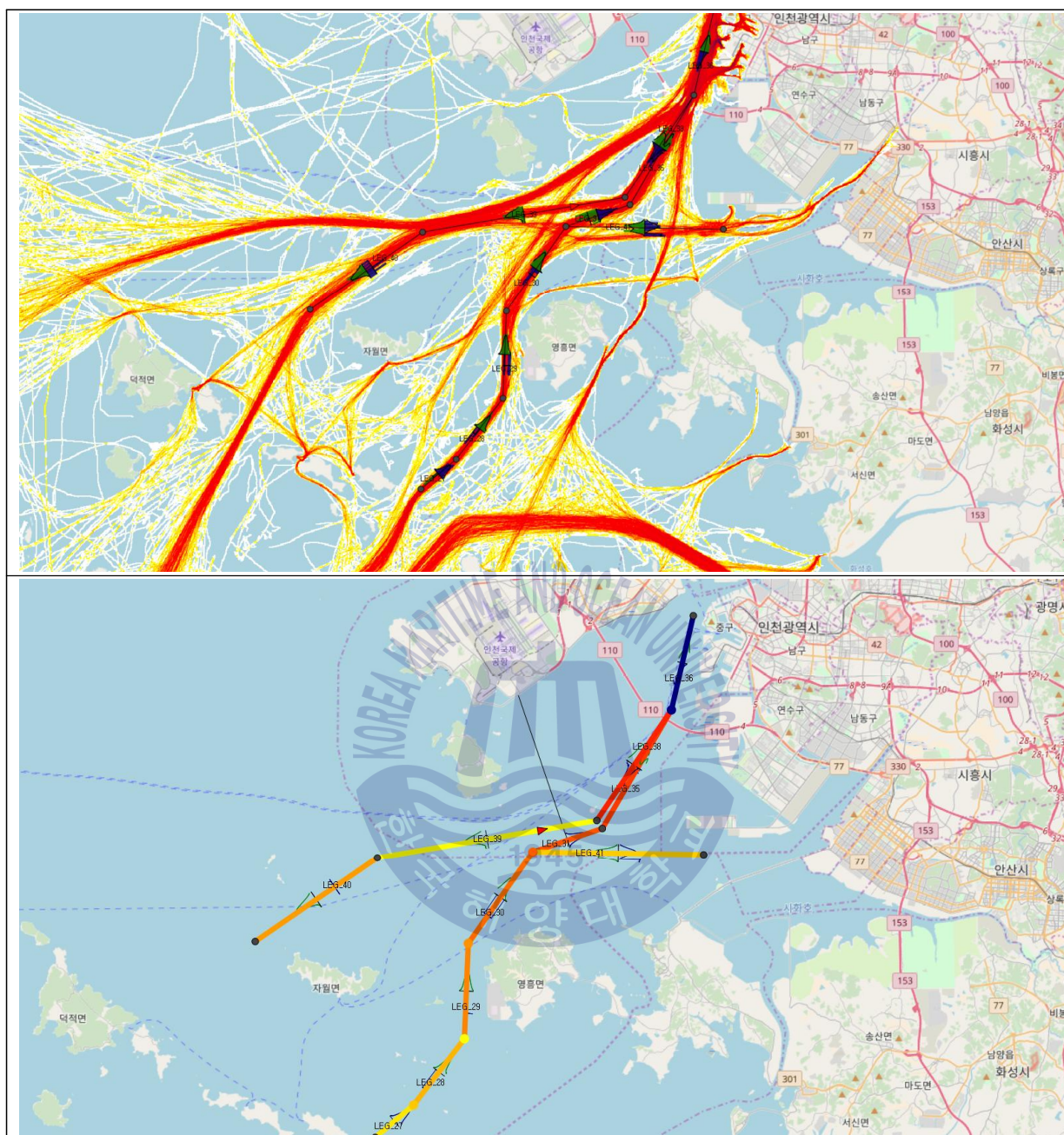


Fig. 27 Traffic data for distribution and density - Incheon

3.2.2 울산항

울산항은 제1항로, 제2항로, 제1,2항로, 제3항로, 제4항로, 울산진입항로 등 총 6개의 항로에서 IWRAP Mk2에 의한 항로 위험도를 평가하였다.

통항선박의 경우, 울산항 및 온산항을 이용하기 위한 100m 미만의 일반화물선이 가장 많은 것으로 분석되었으며, 울산항 및 온산항의 특성상 100m 미만의 탱커선의 통항도 많은 것으로 분석되었다.

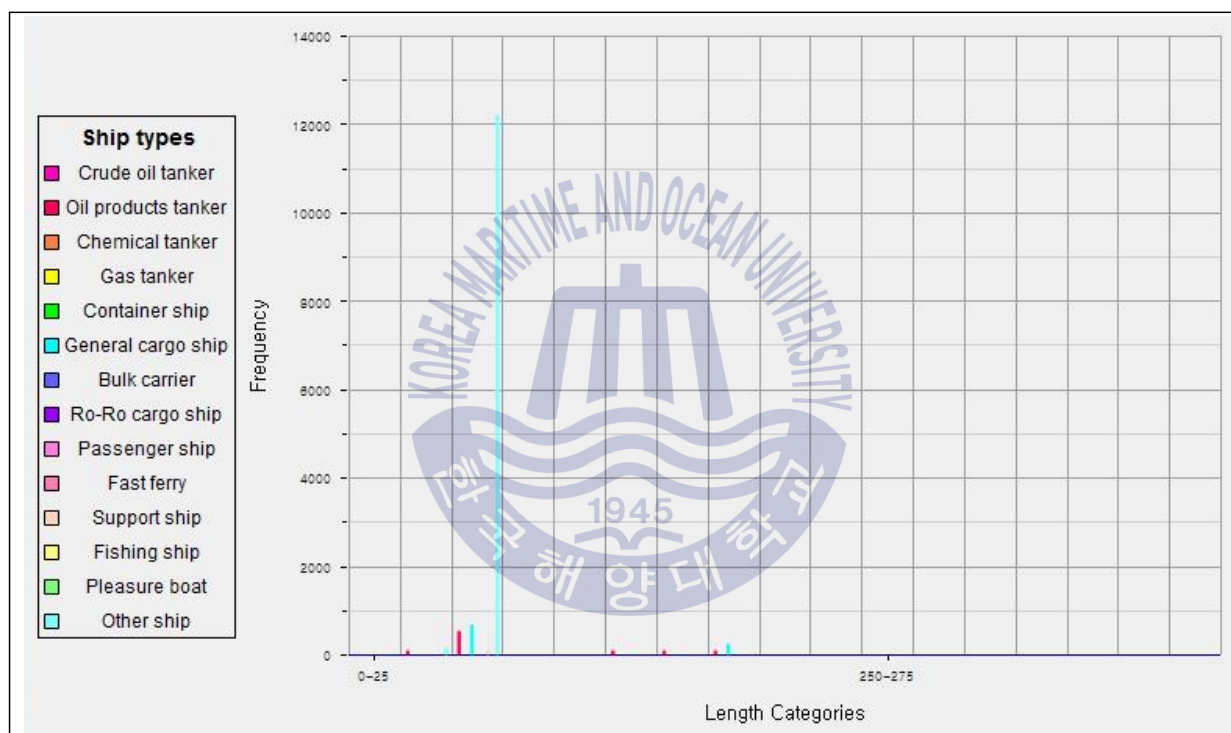


Fig. 28 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제1항로(North bound)

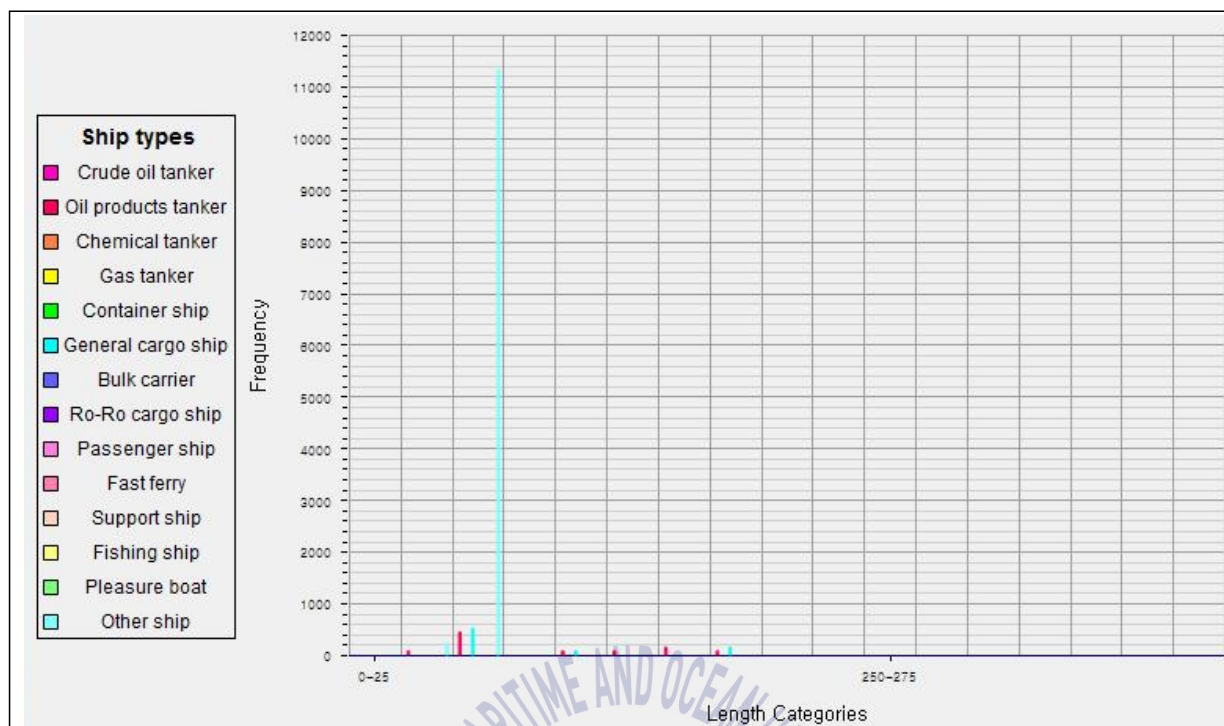


Fig. 29 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제1항로(South bound)

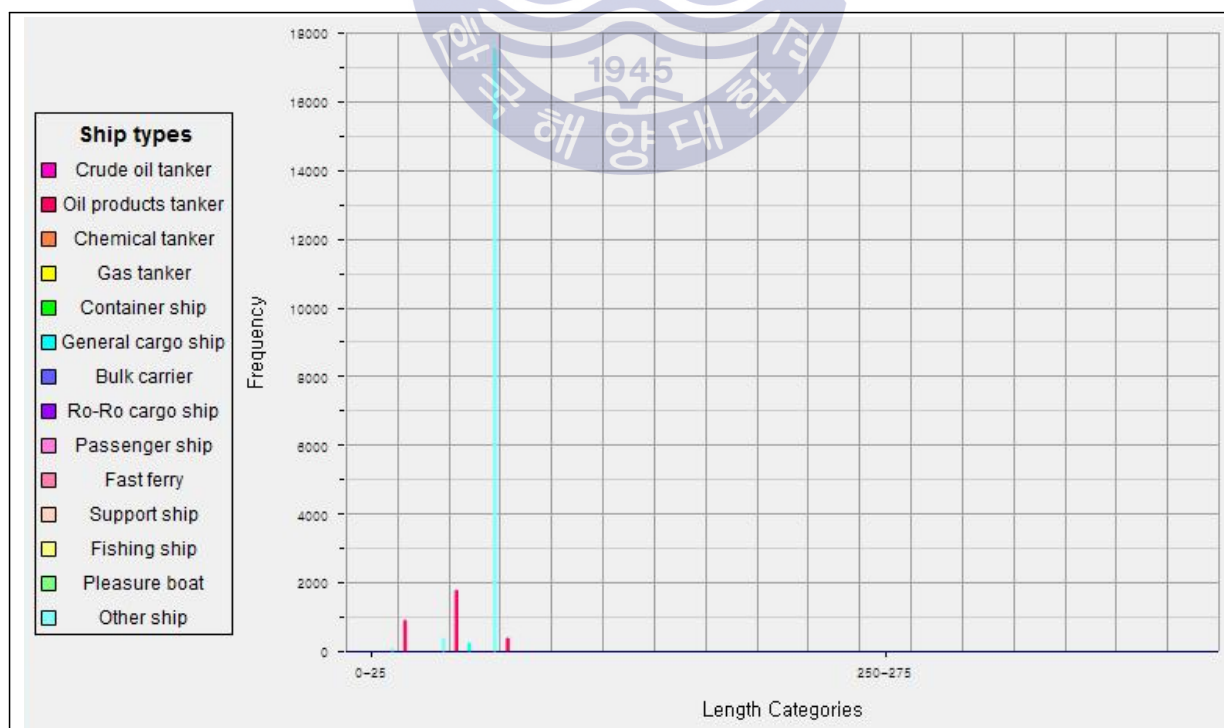


Fig. 30 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제2항로(West bound)

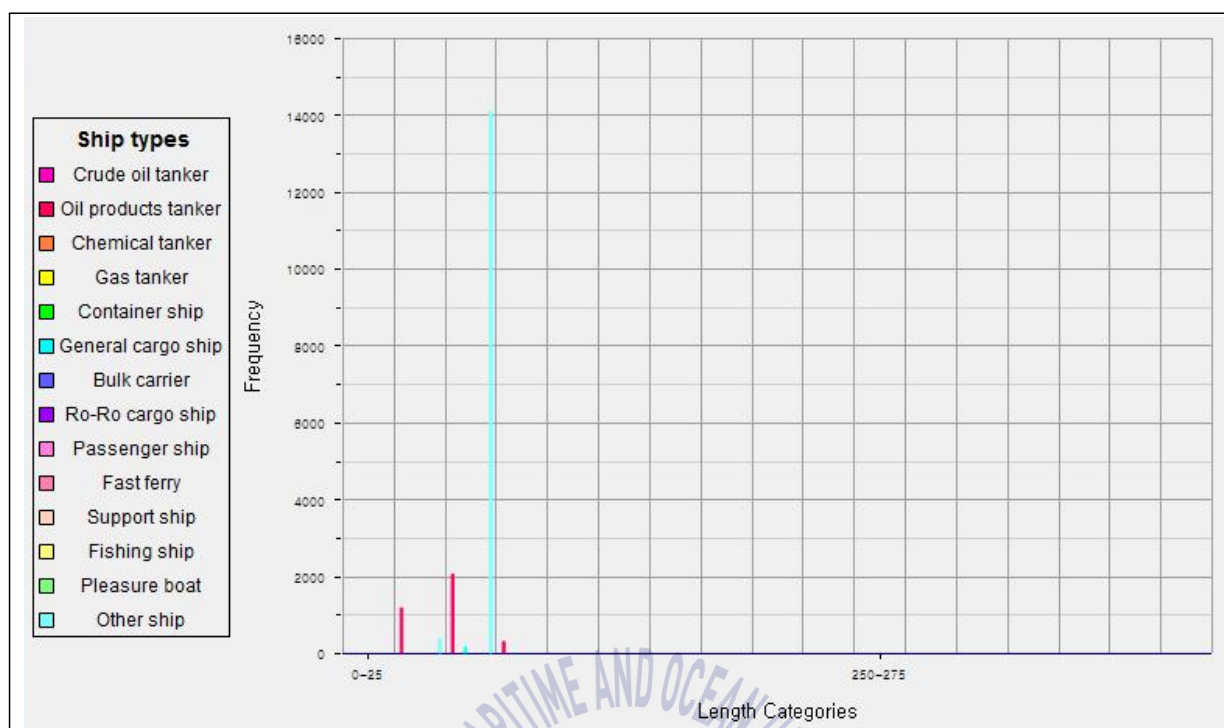


Fig. 31 Traffic Volume Distribution chart – Ulsan 제2항로(East bound)

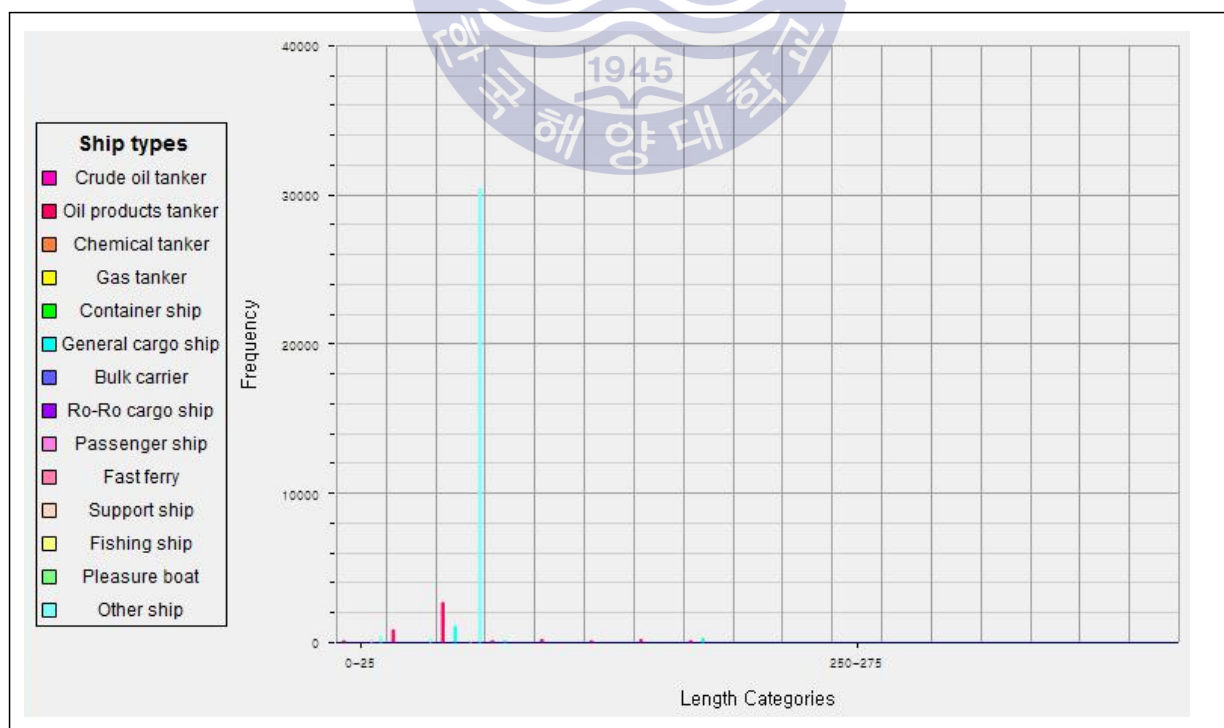


Fig. 32 Traffic Volume Distribution chart – Ulsan 제1,2항로(North bound)

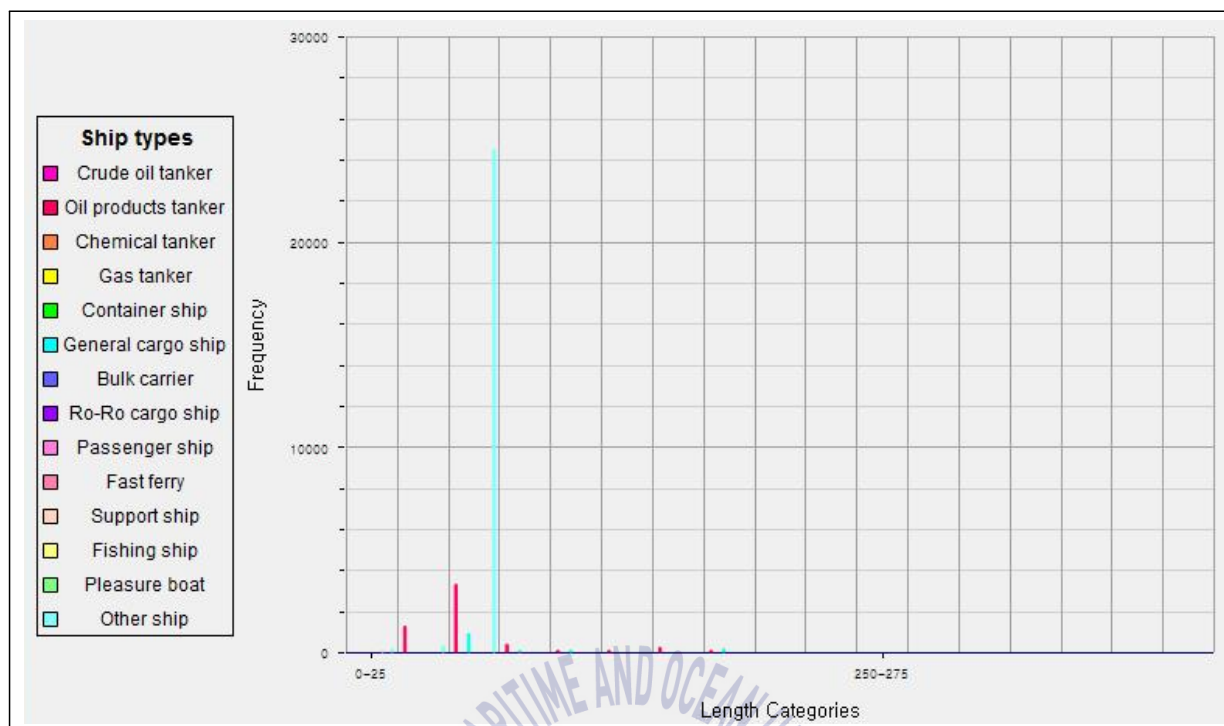


Fig. 33 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제1,2항로(South bound)

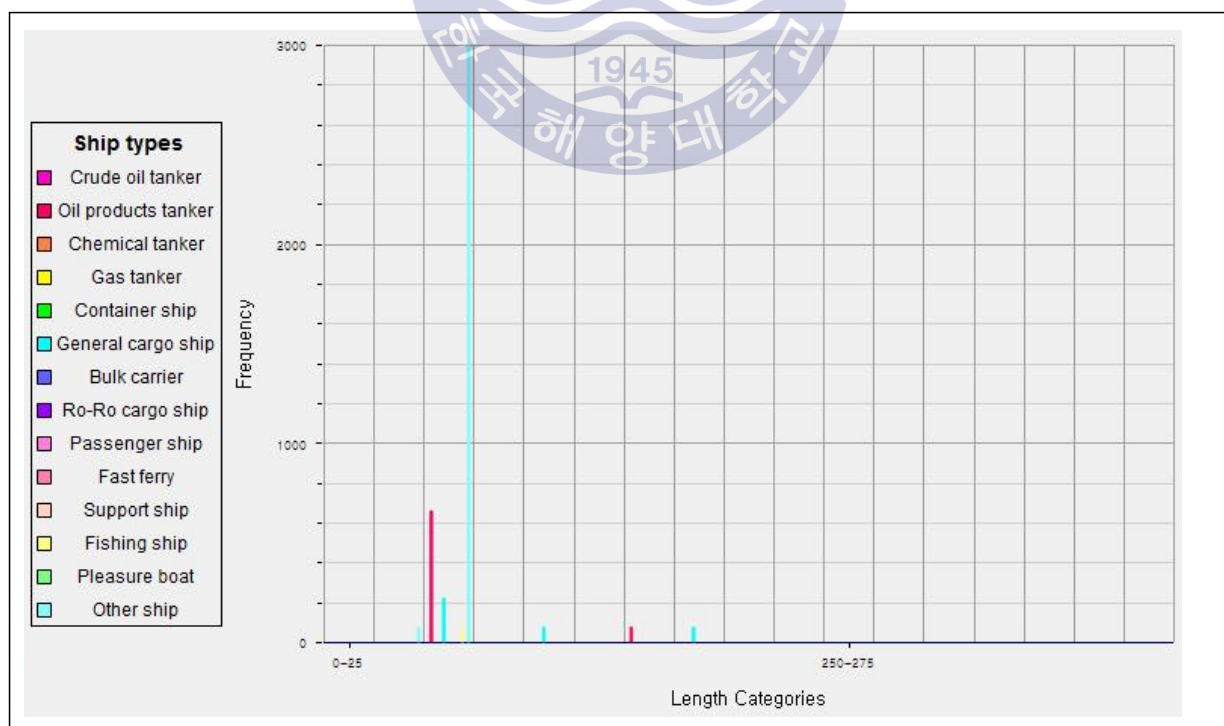


Fig. 34 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제3항로(West bound)

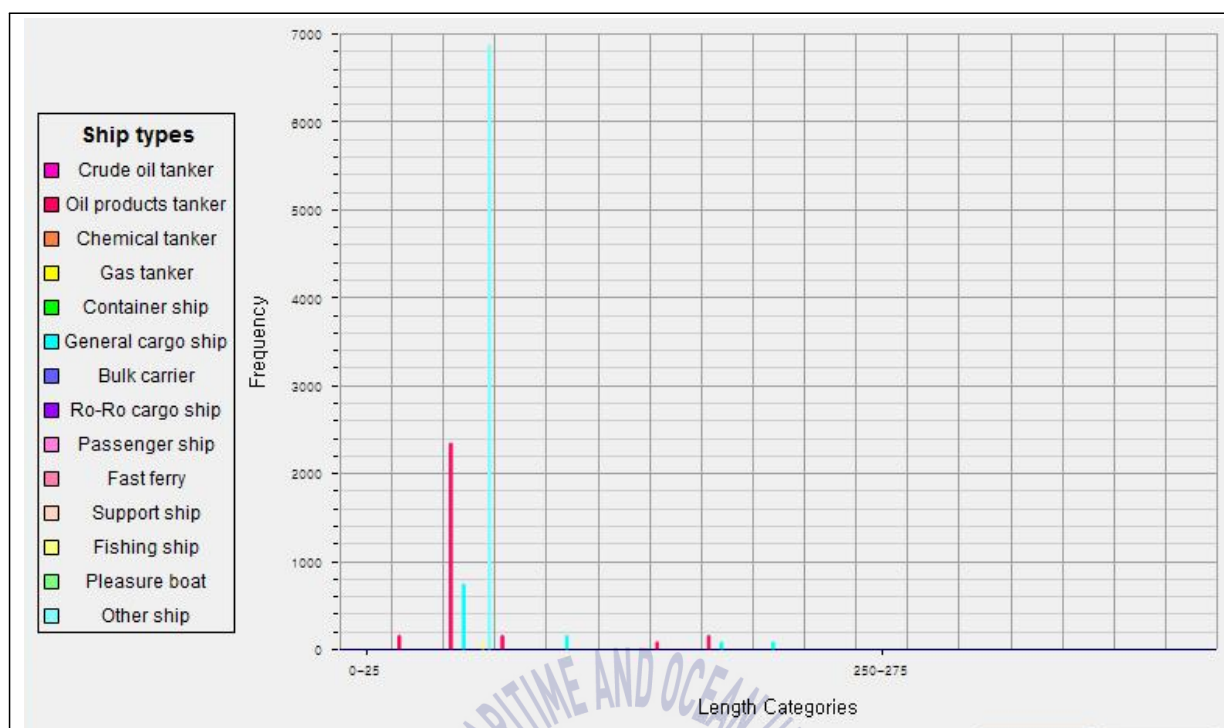


Fig. 35 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제3항로(East bound)

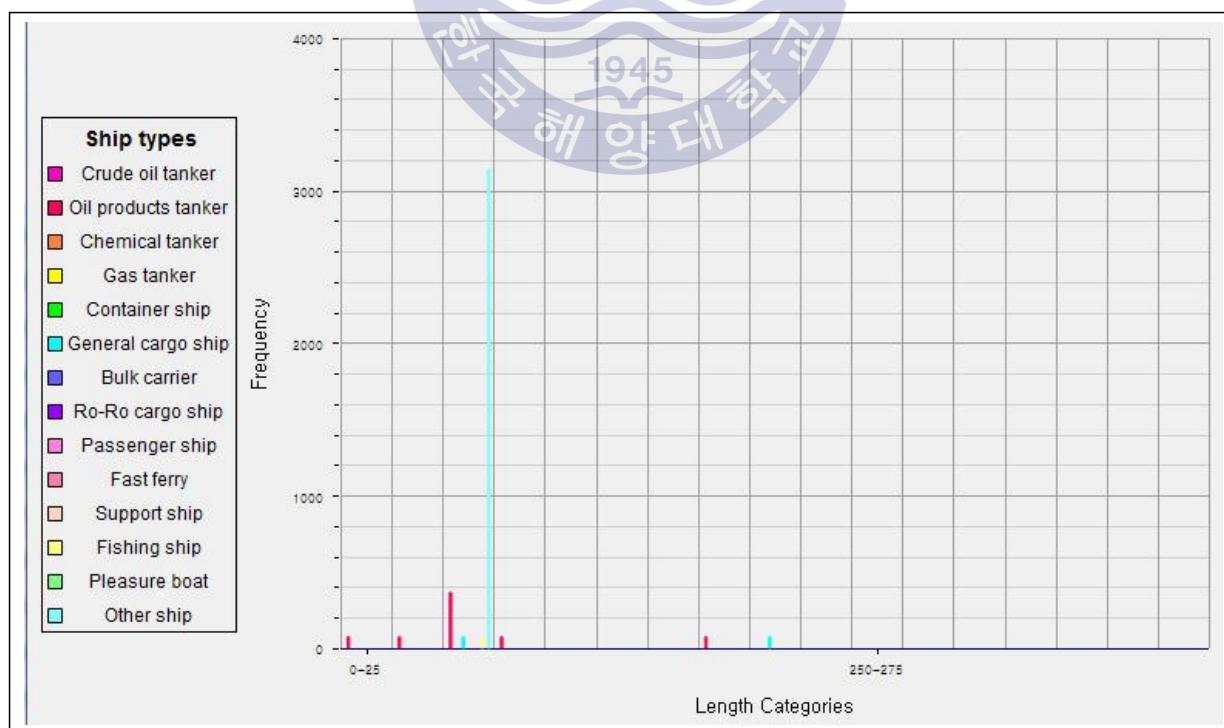


Fig. 36 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제4항로(North bound)

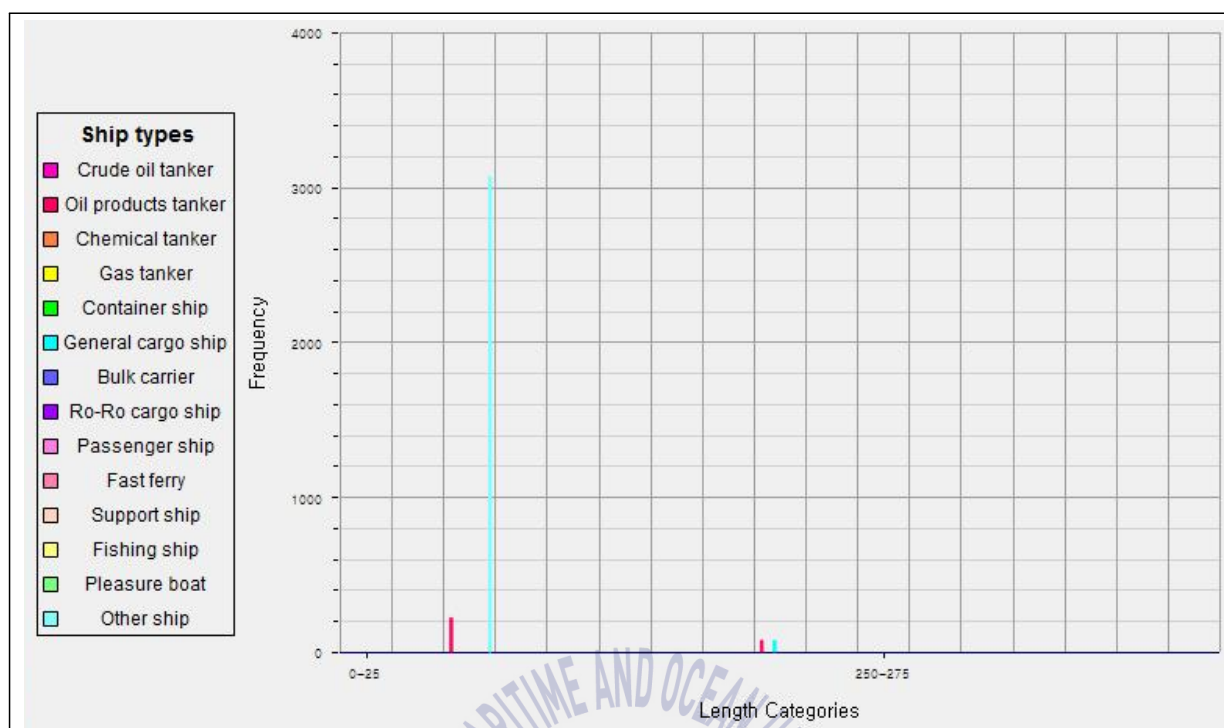


Fig. 37 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 제4항로(South bound)

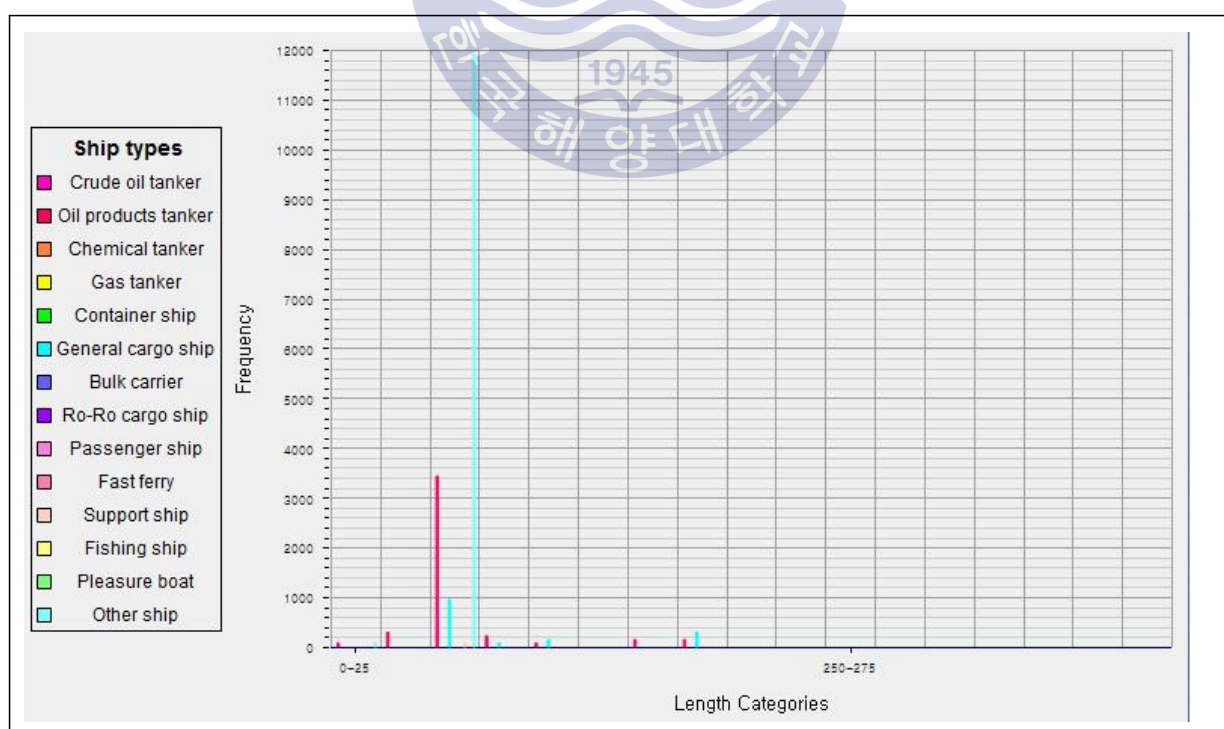


Fig. 38 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 울산진입항로(North bound)

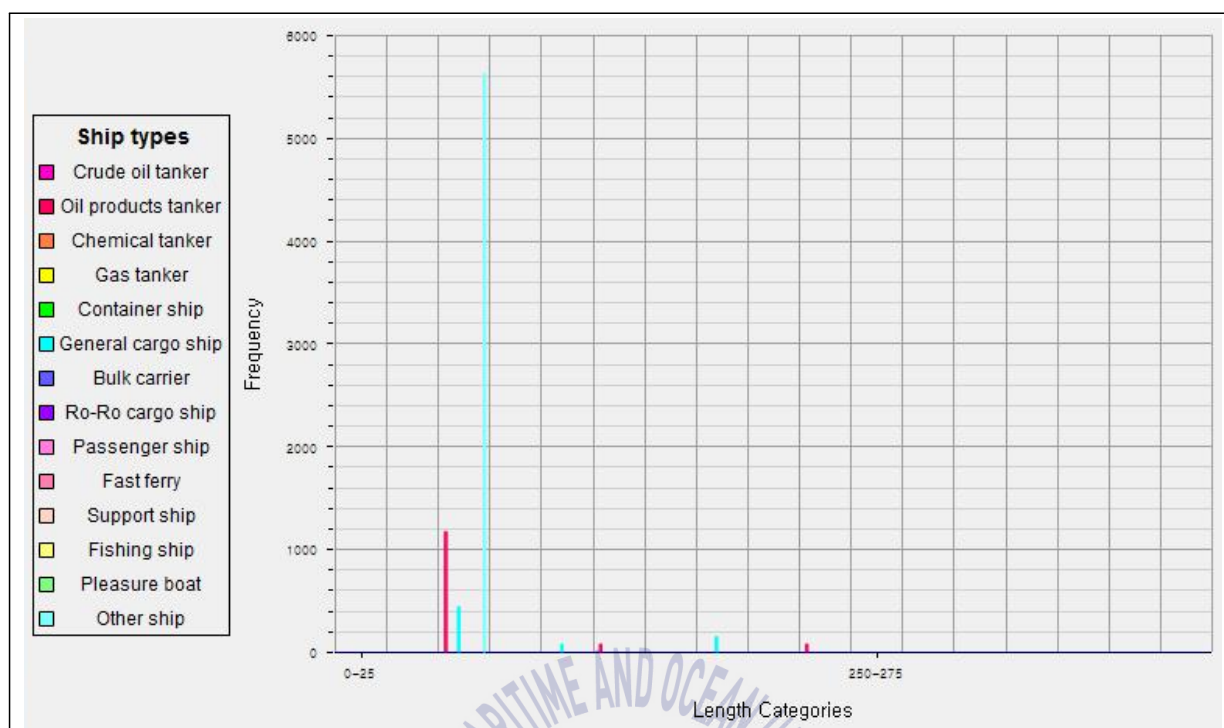


Fig. 39 Traffic Volume Distribution chart - Ulsan 울산진입항로(South bound)

울산항 항만진입수로 충돌 확률은 Table 13과 같이 분석되었으며, 제1항로와 제2항로의 분기점인 제1,2항로에서의 충돌 확률이 가장 높은 것으로 검토되었다. 또한 제 4항로의 경우, 현재 대안항로로 사용되고 있으며, 타 항로보다 통항량이 많지 않아 충돌확률 또한 비교적 낮은 것으로 분석되었다.

Table 13 Collision probability - Ulsan

구 분	일평균척수	Head-on	Overtaking	λ_{Col}
제1항로	132	0.01561	0.00098	0.01660
제2항로	156	0.01962	0.00124	0.02086
제1,2항로	218	0.05593	0.00402	0.05995
제3항로	119	0.00396	0.00044	0.00440
제4항로	42	0.00151	0.00021	0.00171
울산진입항로	75	0.00773	0.00084	0.00858

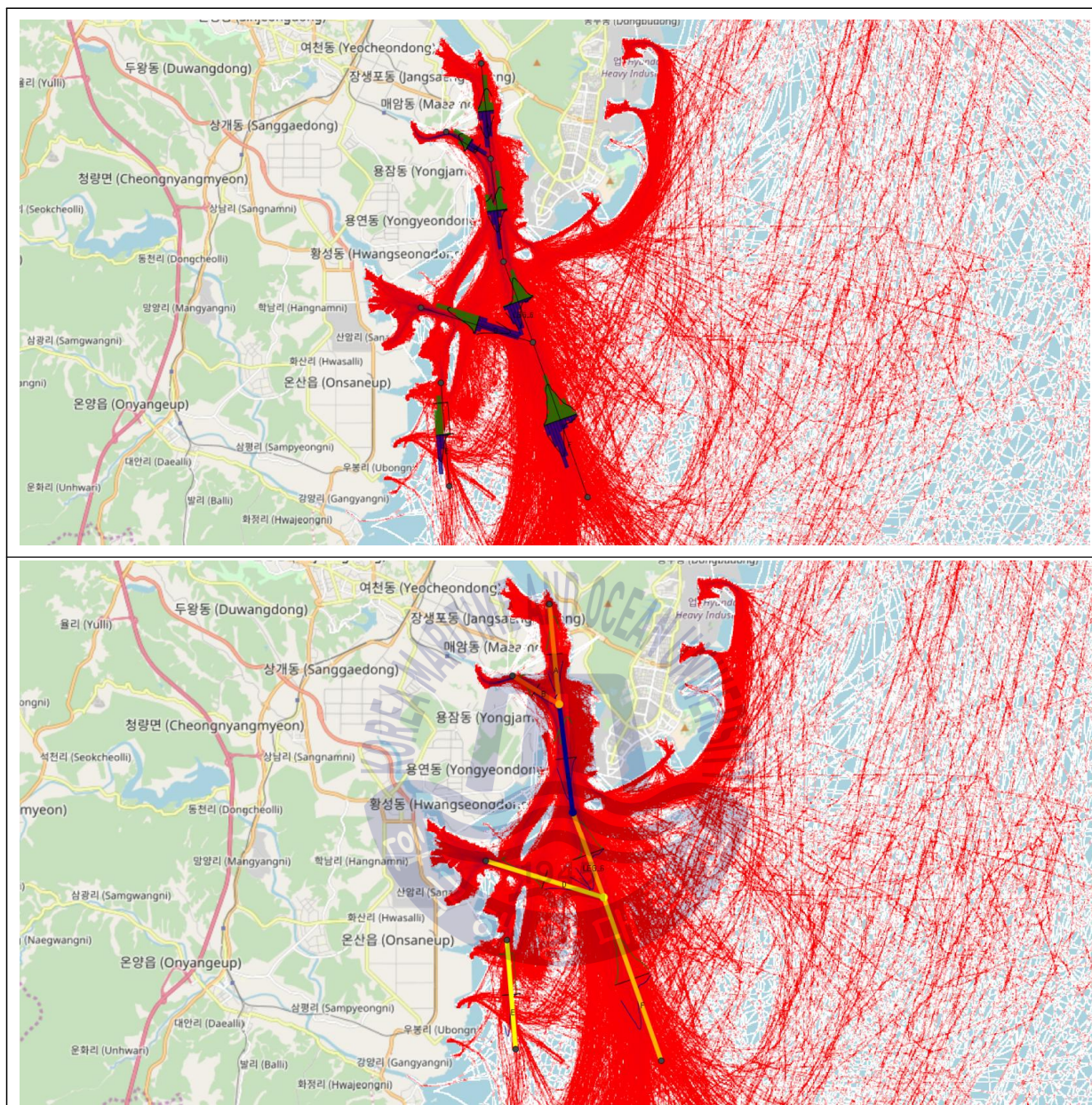


Fig. 40 Traffic data for distribution and density - Ulsan

3.2.3 평택 · 당진항

평택 · 당진항은 진입항로, 서부두 시점 등 총 2개의 항로에서 IWRAP Mk2에 의한 항로 위험도를 평가하였다.

통항선박의 경우, 100m 미만의 일반화물선이 가장 많은 것으로 분석되었으며, 평택 · 당진항 특성상 Ro-Ro ship 및 Passenger ship도 다수 통항하고 있는 것으로 분석되었다.

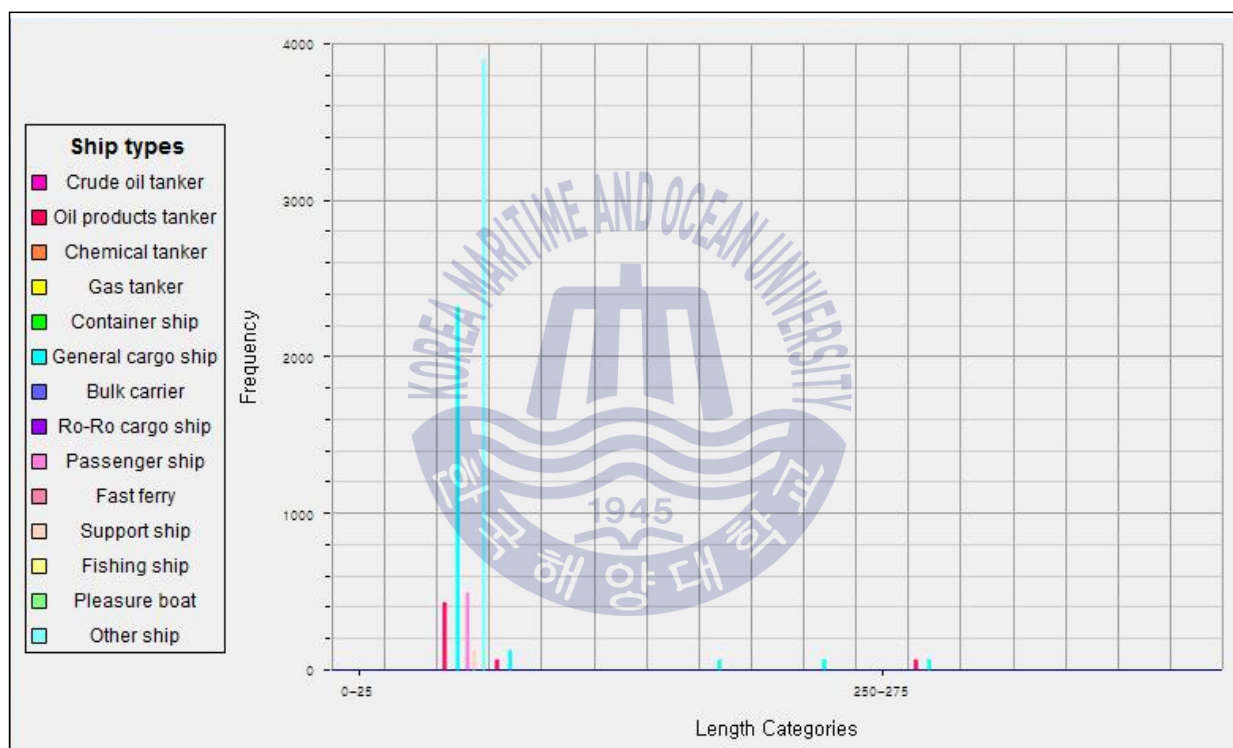


Fig. 41 Traffic Volume Distribution chart – Pyongteak · Dangjin
진입항로(North bound)

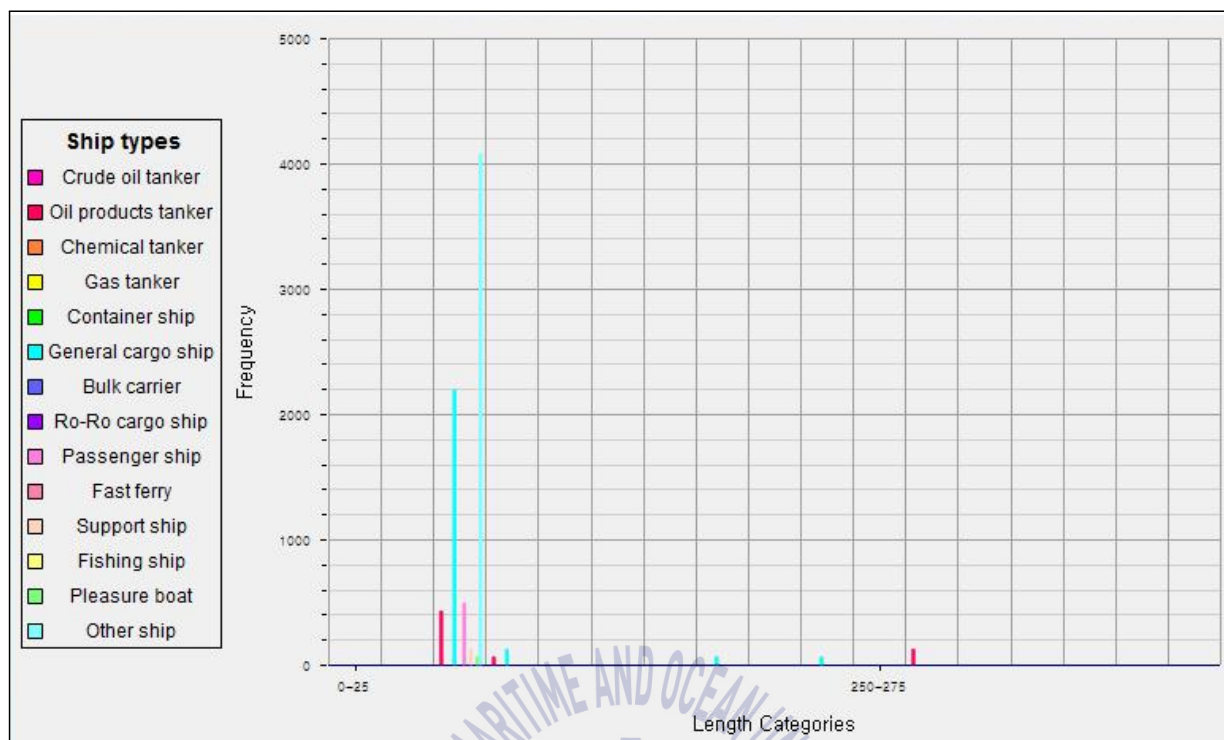


Fig. 42 Traffic Volume Distribution chart - Pyongteak · Dangjin

진입항로(South bound)

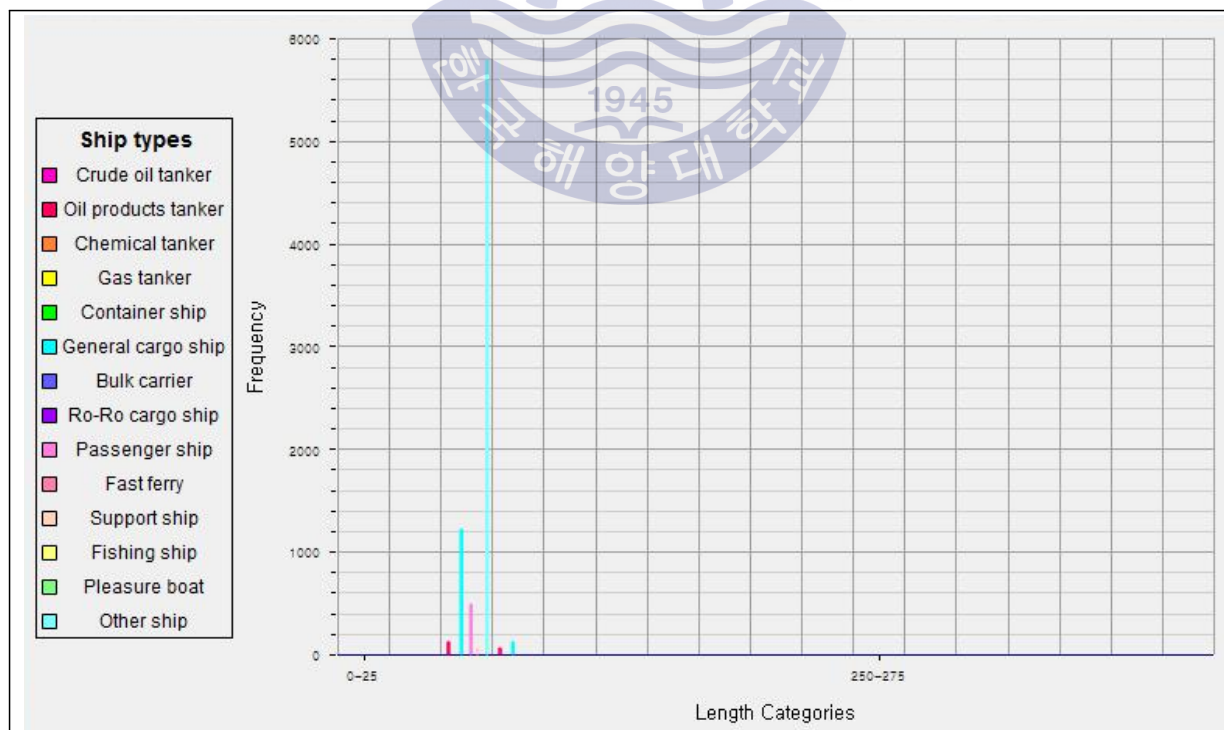


Fig. 43 Traffic Volume Distribution chart - Pyongteak · Dangjin 서부두

시점(West bound)

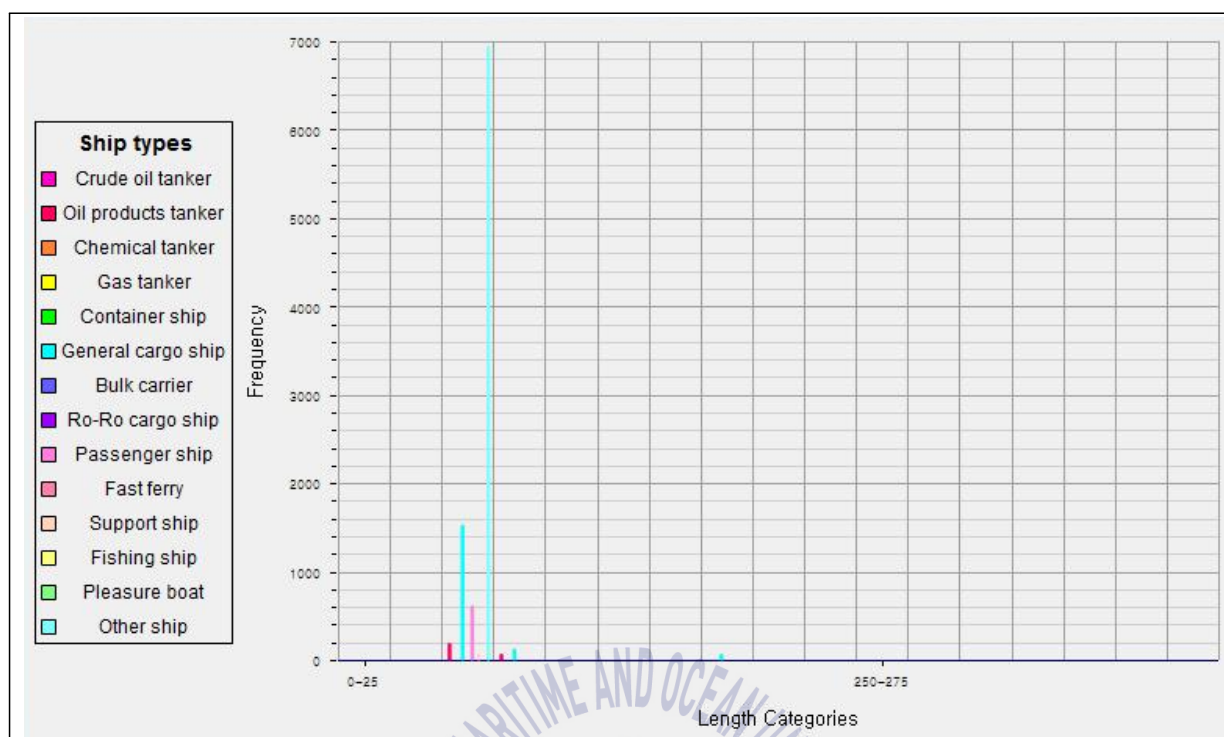


Fig. 44 Traffic Volume Distribution chart - Pyongteak · Dangjin 서부두 시점(East bound)

평택 · 당진항의 충돌확률은 Table 14와 같이 분석되었으며, 진입항로에서의 충돌확률이 서부두 시점보다 다소 높은 것으로 분석되었다.

Table 14 Collision probability - Pyongteak · Dangjin

구 분	일평균척수	Head-on	Overtaking	λ_{Col}
진입항로	61	0.00206	0.00022	0.00228
서부두 시점	21	0.00086	0.00053	0.00133



Fig. 45 Traffic data for distribution and density – Pyongteak · Dangjin

3.2.4 부산항

부산항은 조도방파제, 부산항대교, 부산대교, 남항대교, 감천항방파제 등 총 5개의 항로에서 IWRAP Mk2에 의한 항로 위험도를 평가하였다.

통항선박의 경우, 100m 미만의 일반화물선이 가장 많은 것으로 분석되었으며, 소형 탱커선의 통항도 존재하는 것으로 분석되었다.

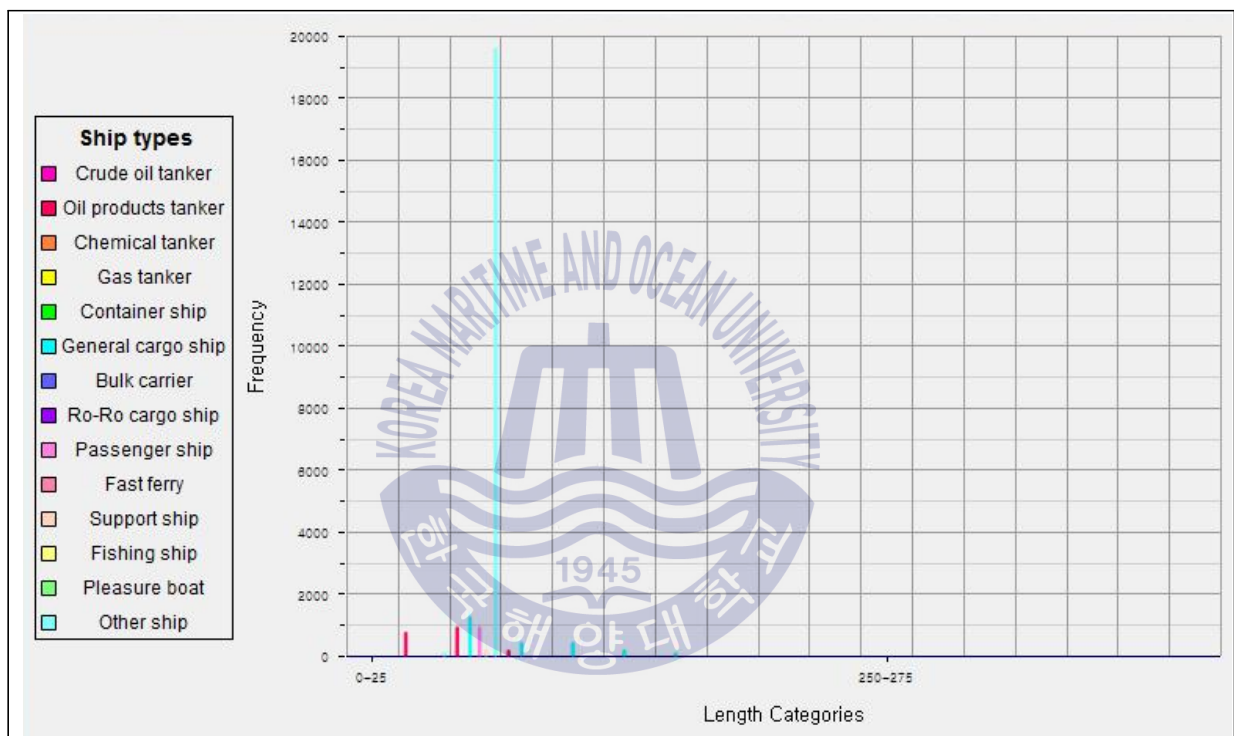


Fig. 46 Traffic Volume Distribution chart – Busan 조도방파제(West bound)

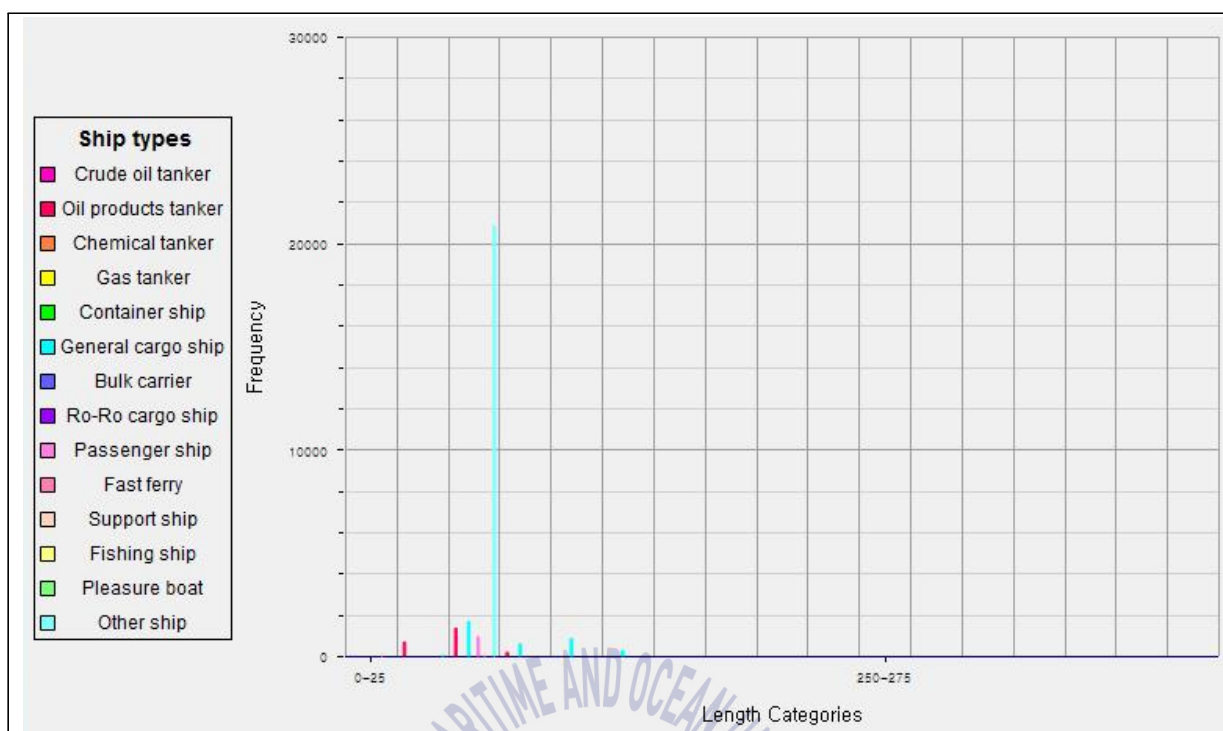


Fig. 47 Traffic Volume Distribution chart - Busan 조도방파제(East bound)

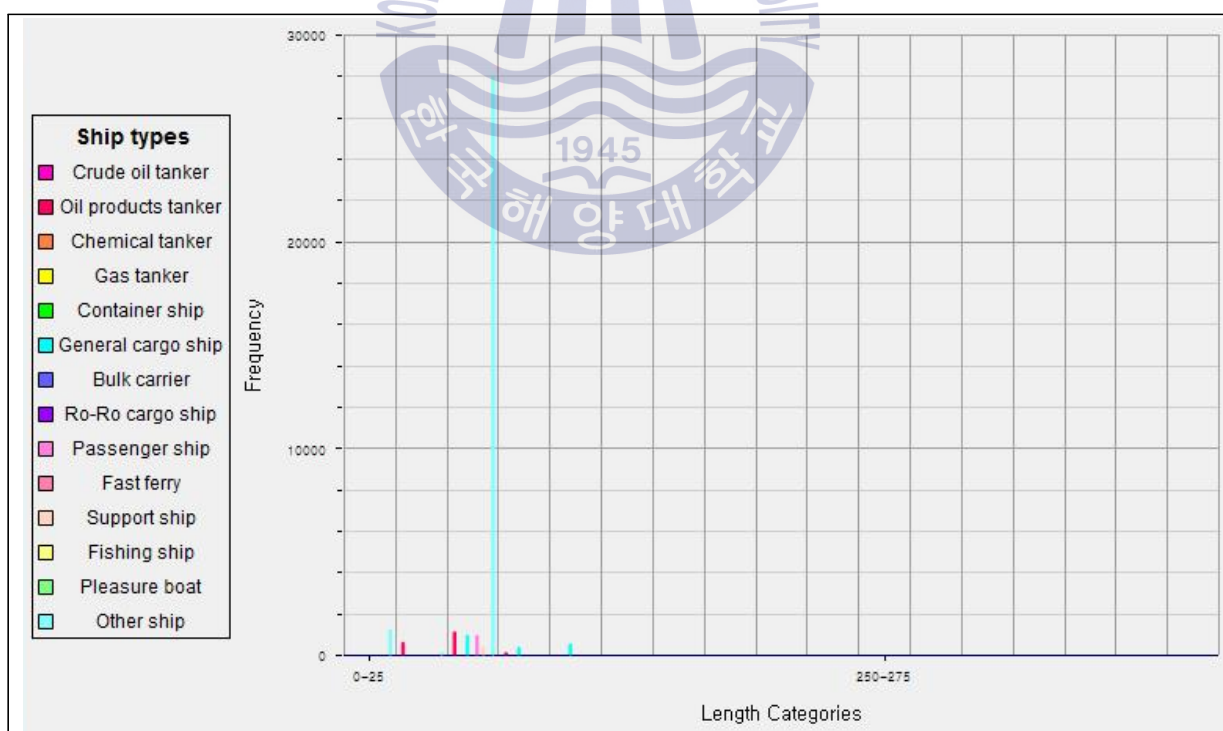


Fig. 48 Traffic Volume Distribution chart - Busan 부산항대교(West bound)

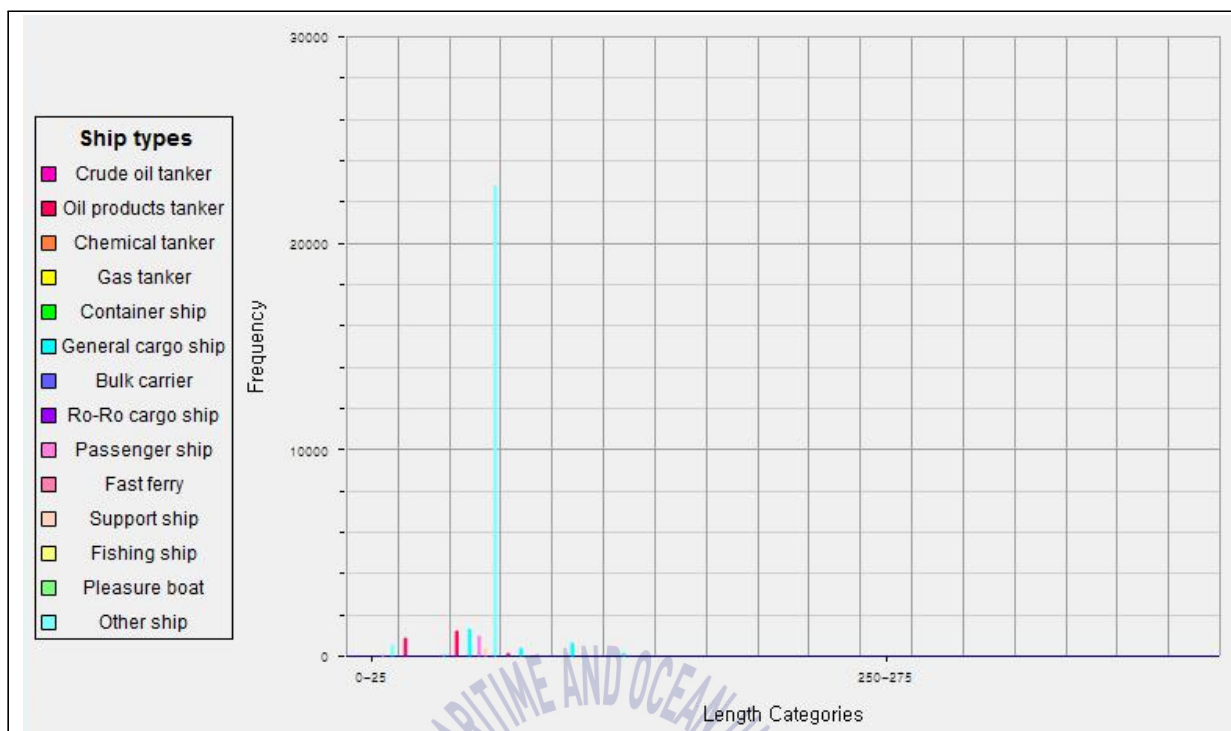


Fig. 49 Traffic Volume Distribution chart – Busan 부산항대교(East bound)

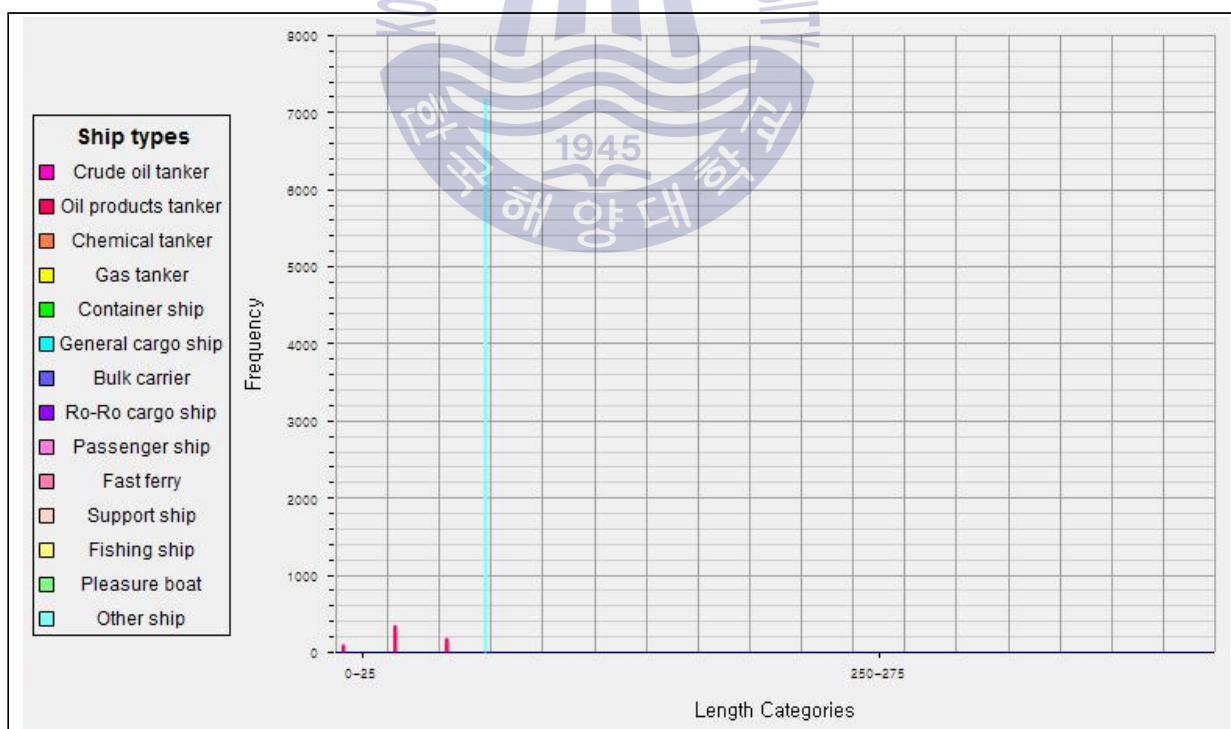


Fig. 50 Traffic Volume Distribution chart – Busan 부산대교(North bound)

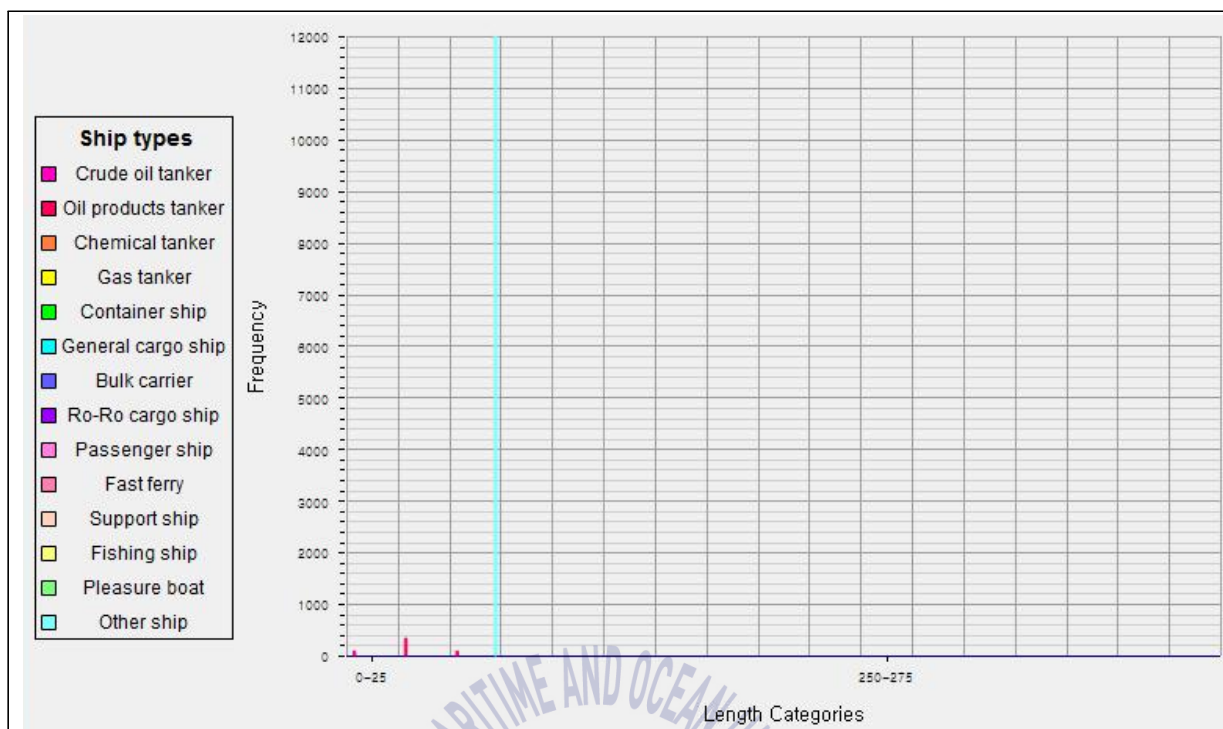


Fig. 51 Traffic Volume Distribution chart – Busan 부산대교(South bound)

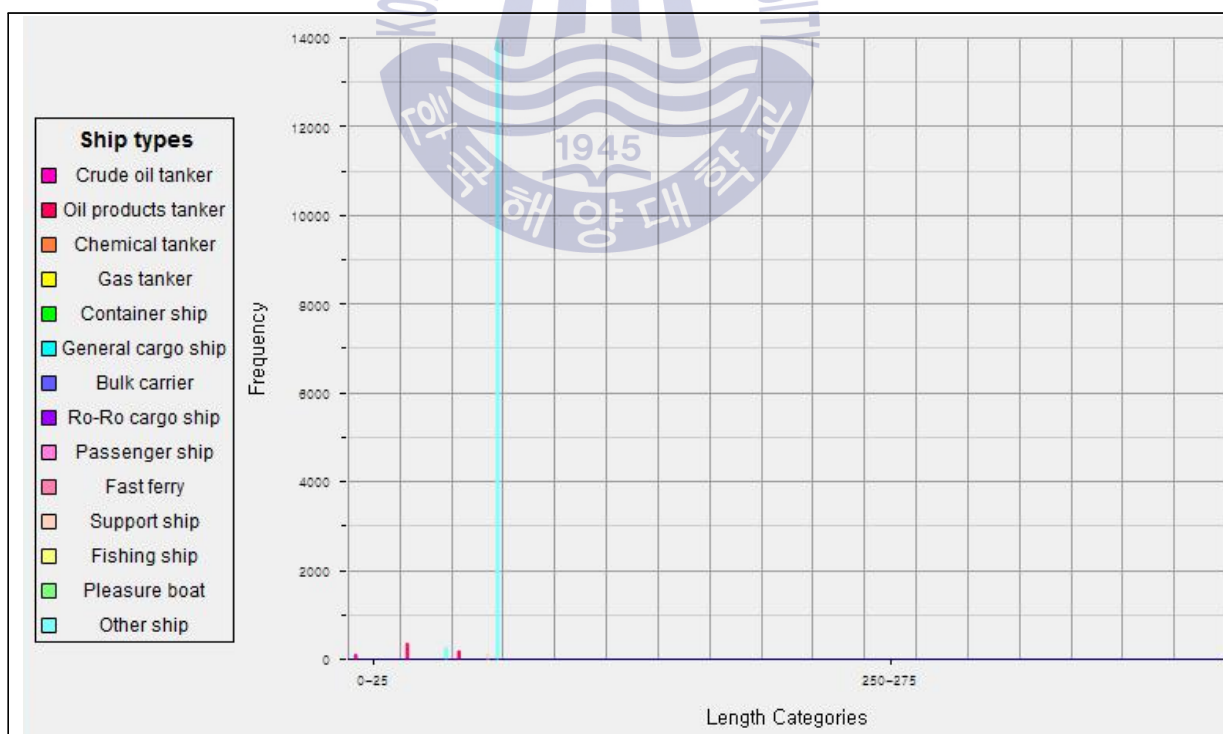


Fig. 52 Traffic Volume Distribution chart – Busan 남항대교(North bound)

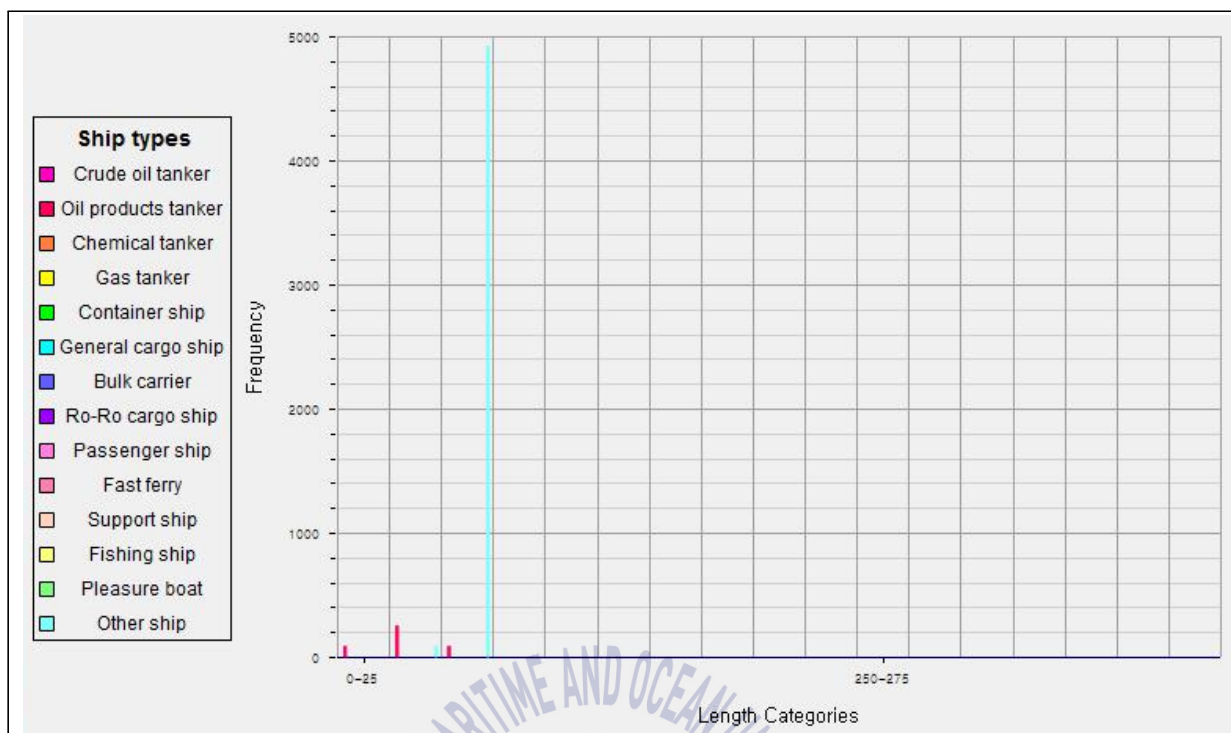


Fig. 53 Traffic Volume Distribution chart – Busan 남항대교(South bound)

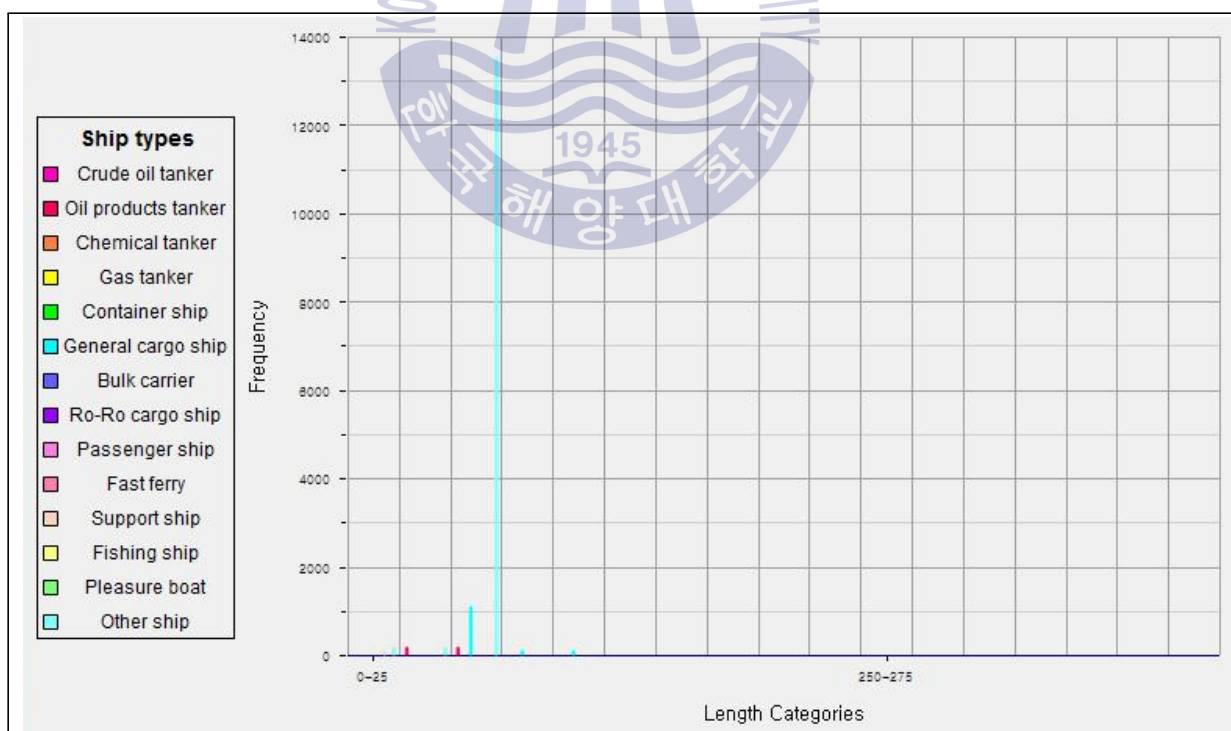


Fig. 54 Traffic Volume Distribution chart – Busan 감천항방파제(North bound)

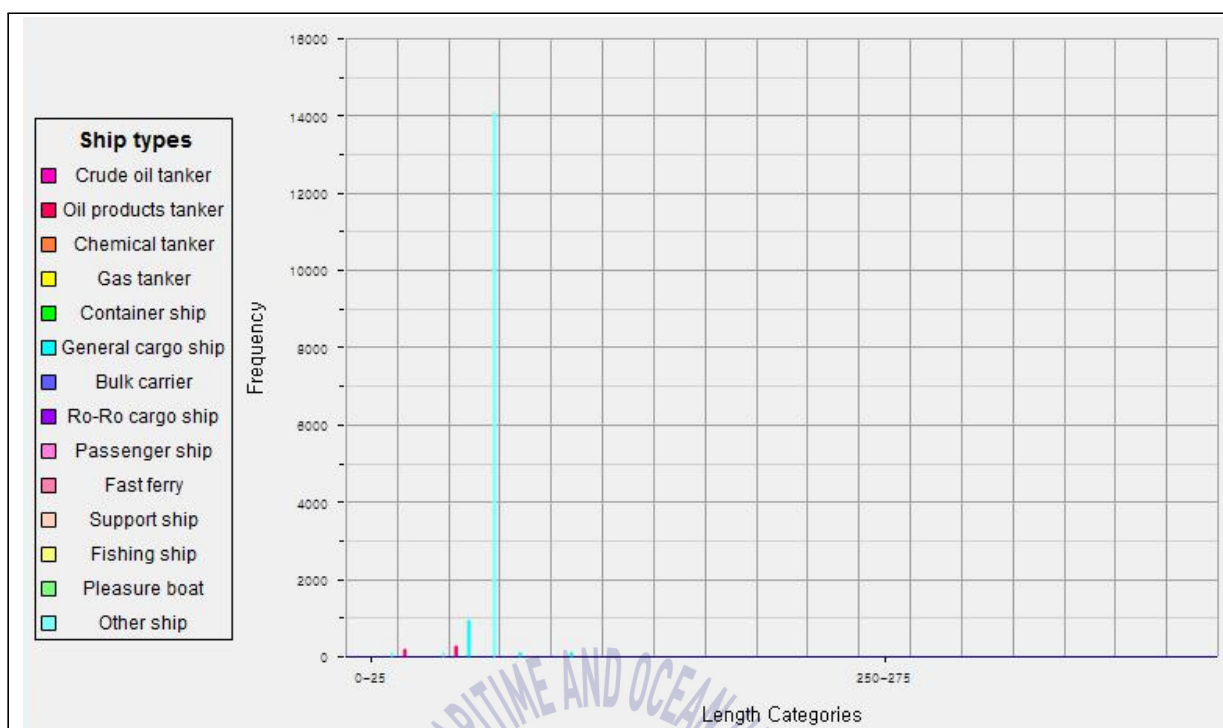


Fig. 55 Traffic Volume Distribution chart - Busan 감천항방파제(South bound)

부산항의 충돌확률은 Table 15와 같이 분석되었으며, 일평균척수가 가장 많은 조도방파제 및 부산항대교에서의 충돌 확률이 가장 높은 것으로 검토되었다.

Table 15 Collision probability - Busan

구 분	일평균척수	Head-on	Overtaking	λ_{Col}
조도방파제	148	0.02872	0.01147	0.04019
부산항대교	202	0.03182	0.00688	0.03870
부산대교	15	0.01099	0.00012	0.01111
남항대교	76	0.01157	0.00023	0.01180
감천항방파제	109	0.02387	0.00085	0.02473



Fig. 56 Traffic data for distribution and density – Busan

3.2.5 부산항신항

부산항신항은 동방파제, 토도남측, 토도북측 등 총 3개의 항로에서 IWRAP Mk2에 의한 항로 위험도를 평가하였다.

통항선박의 경우, 부산항신항을 이용하는 선박은 대부분 컨테이너선인 것으로 조사되었으나, AIS상 선종은 일반화물선으로 구분되어 있기 때문에 IWRAP상에서도 일반화물선이 가장 많은 것으로 분석되었다. 또한 대형선박이 다수 이용하는 부산항 신항의 특성상 길이 250m 이상의 대형선박의 흐름도 존재하는 것으로 조사되었다.

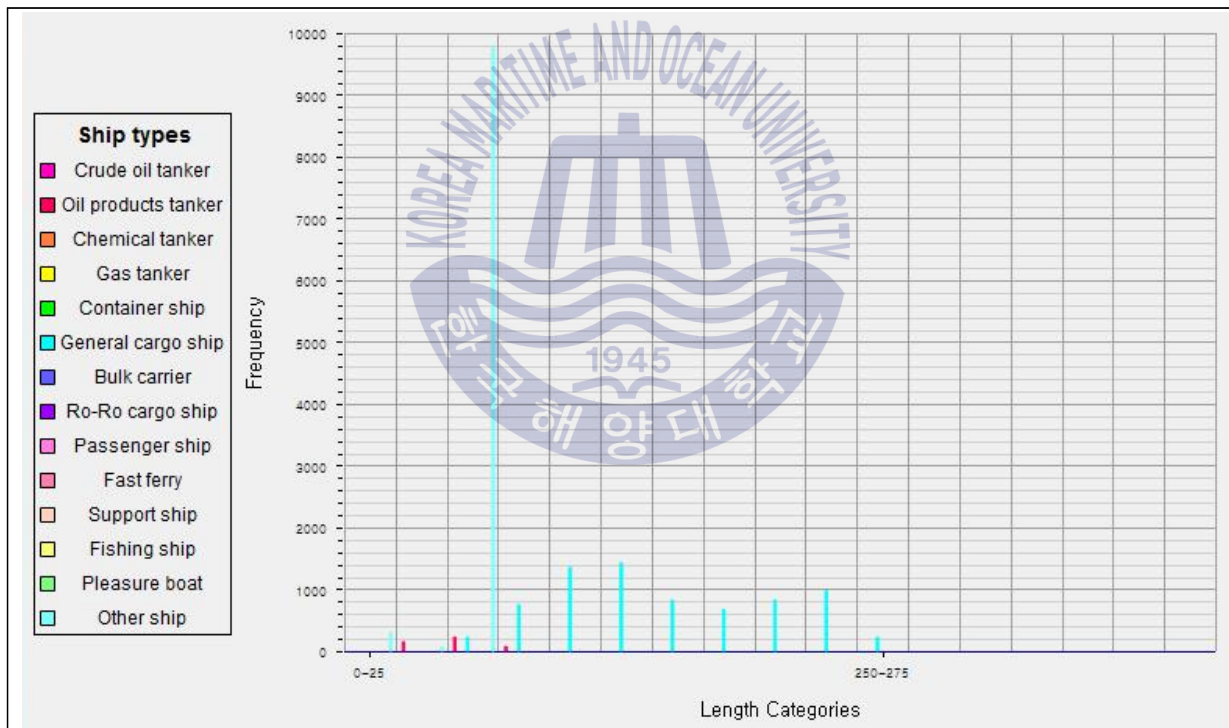


Fig. 57 Traffic Volume Distribution chart – Busan Newport 동방파제(North bound)

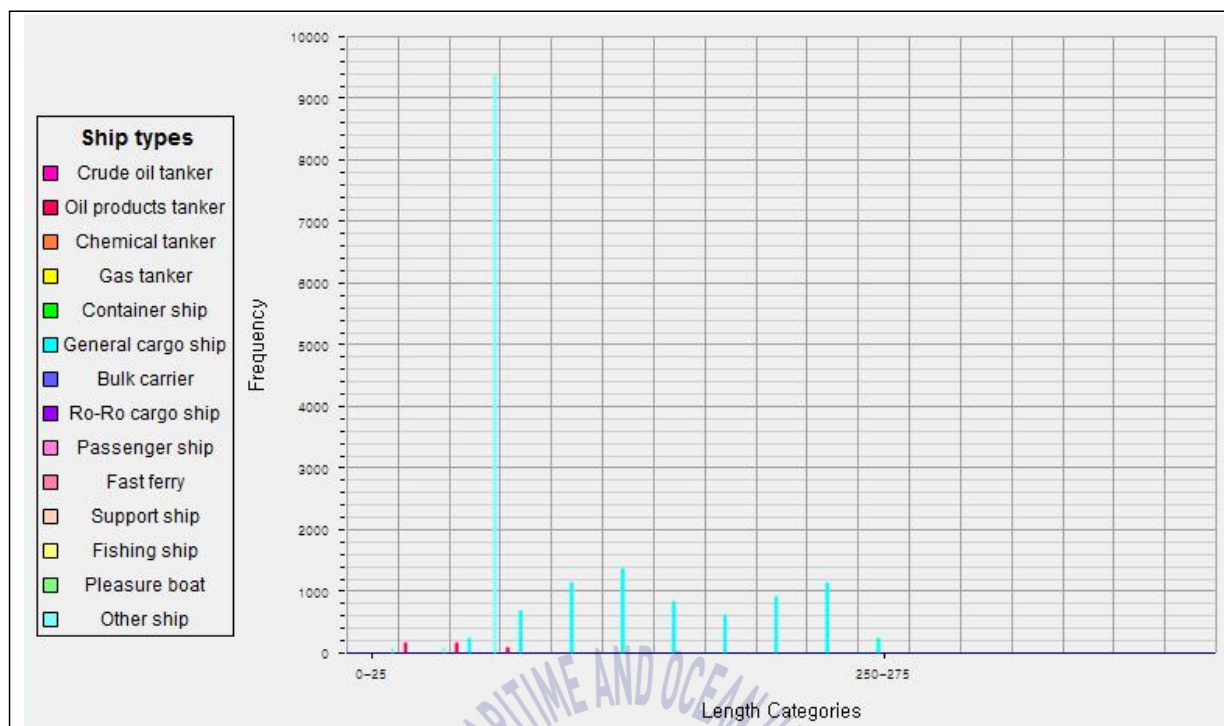


Fig. 58 Traffic Volume Distribution chart - Busan Newport 동방파제(East bound)

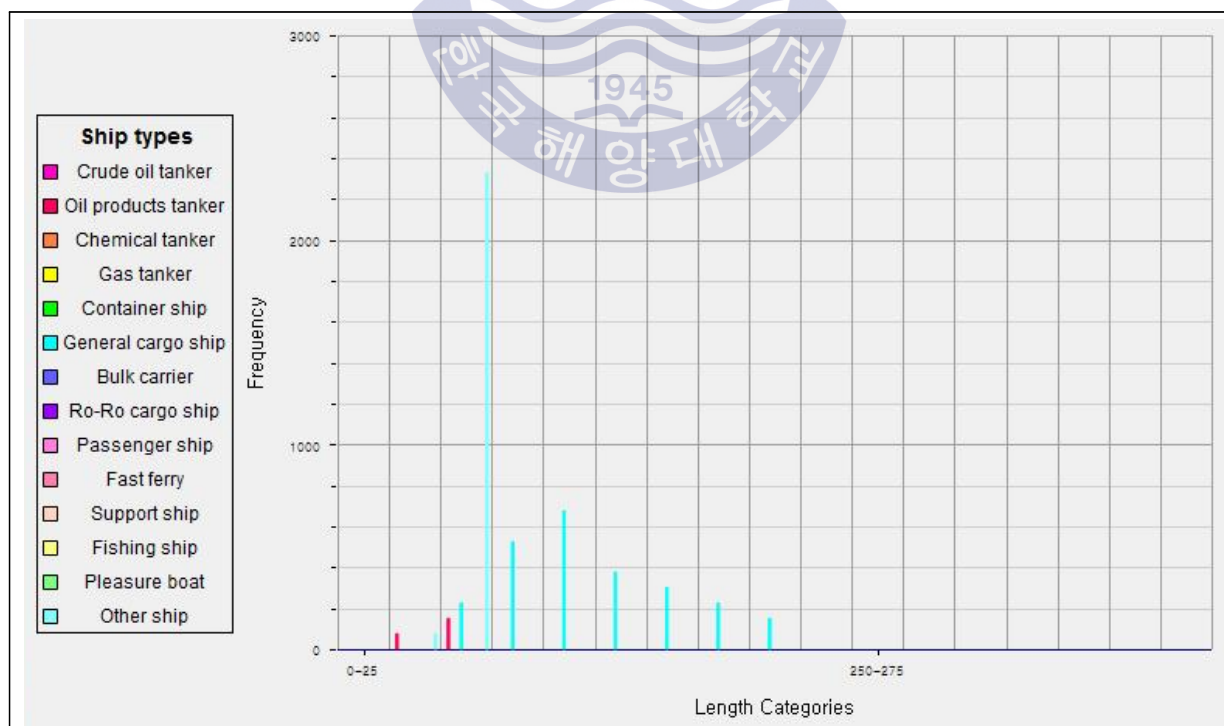


Fig. 59 Traffic Volume Distribution chart - Busan Newport 토도남측(West bound)

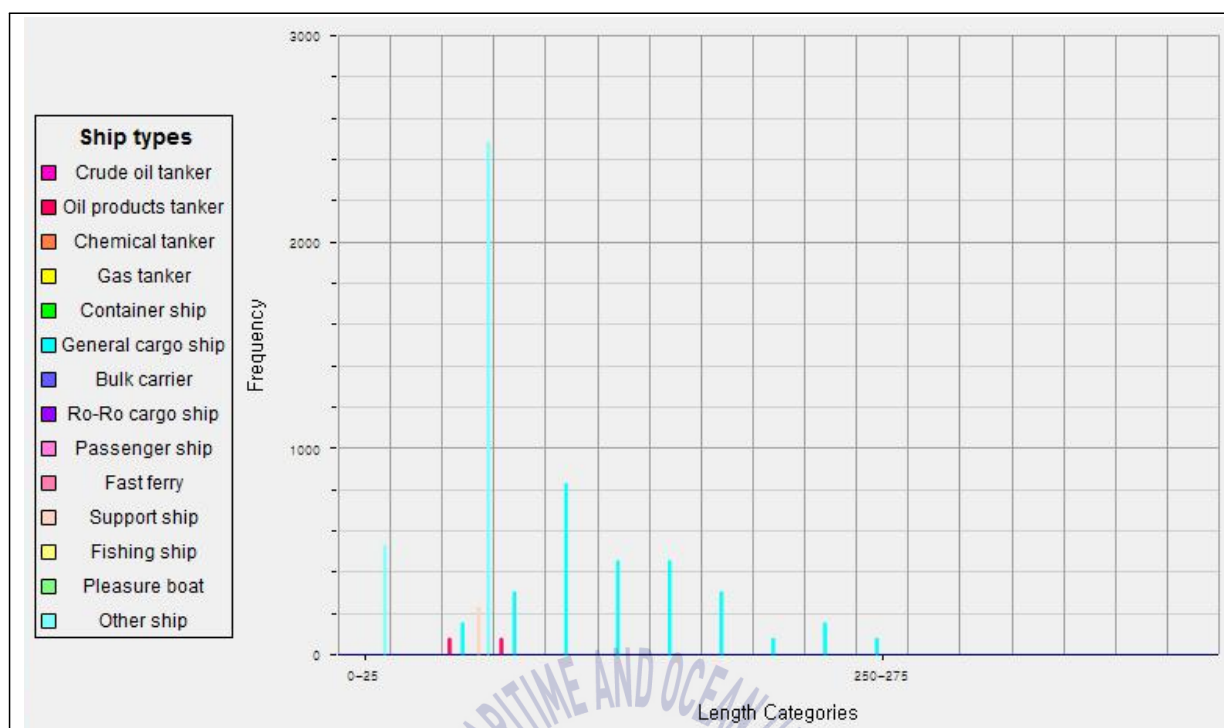


Fig. 60 Traffic Volume Distribution chart - Busan Newport 토도남측(East bound)

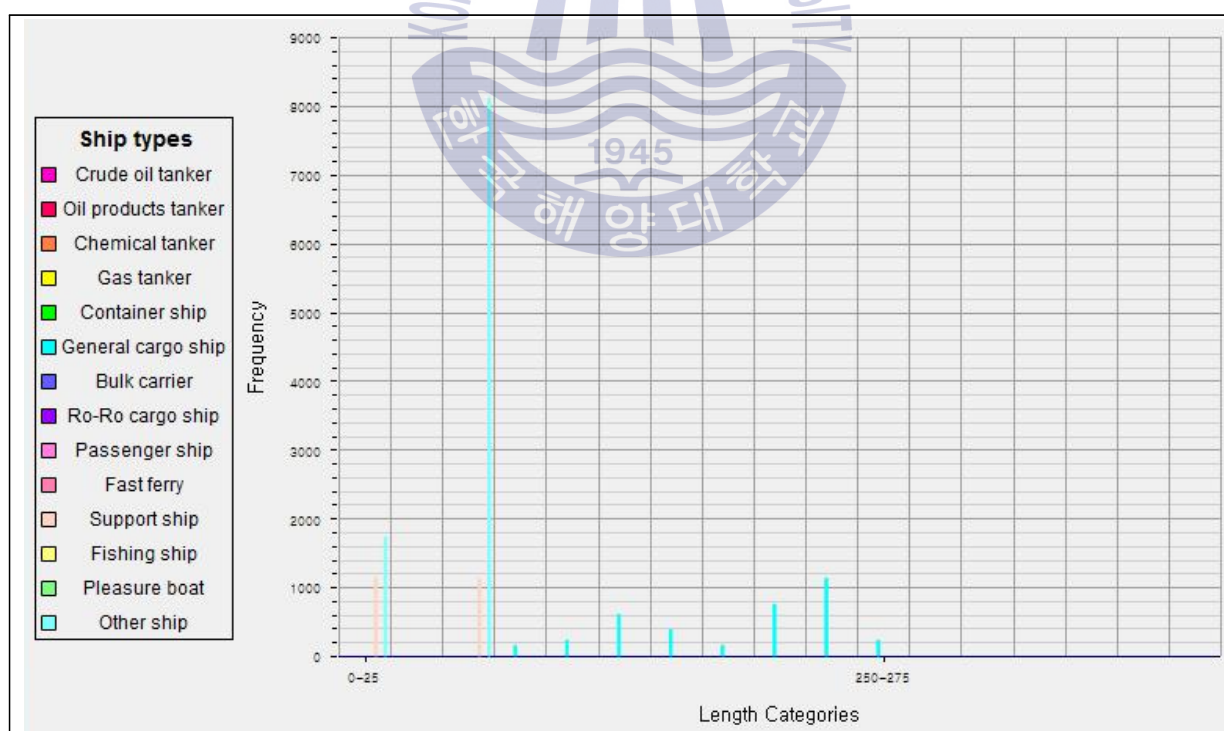


Fig. 61 Traffic Volume Distribution chart - Busan Newport 토도북측(West bound)

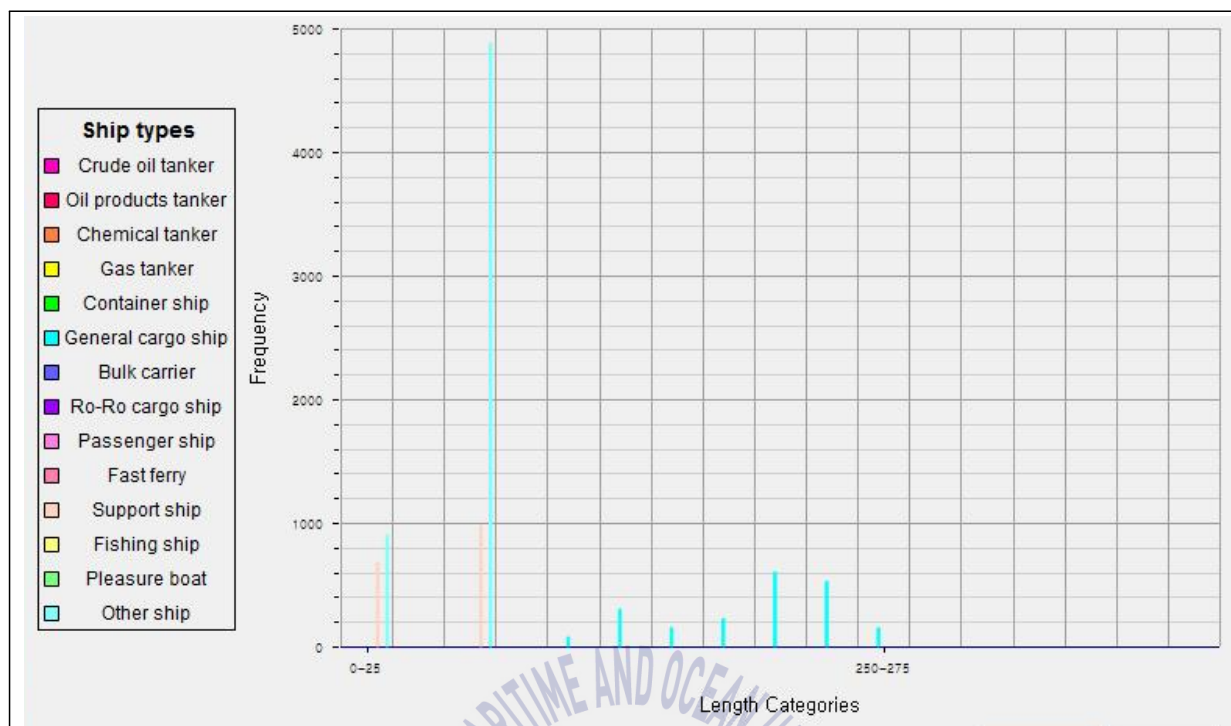


Fig. 62 Traffic Volume Distribution chart - Busan Newport 토도북측(East bound)

부산항신항의 충돌확률 Table 16과 같이 분석되었으며, 동방과제에서의 충돌 확률이 가장 높은 것으로 분석되었다. 또한 GICOMS Data 조사 당시 토도남측 준설 공사로 인하여 항로폭이 축소되고 통행이 제한되어 토도북측보다 충돌확률이 비교적 낮은 것으로 조사되었다.

Table 16 Collision probability - Busan Newport

구 분	일평균척수	Head-on	Overtaking	λ_{col}
동방과제	127	0.05130	0.00477	0.05861
토도남측	61	0.00771	0.00139	0.00554
토도북측	145	0.00422	0.00119	0.00931

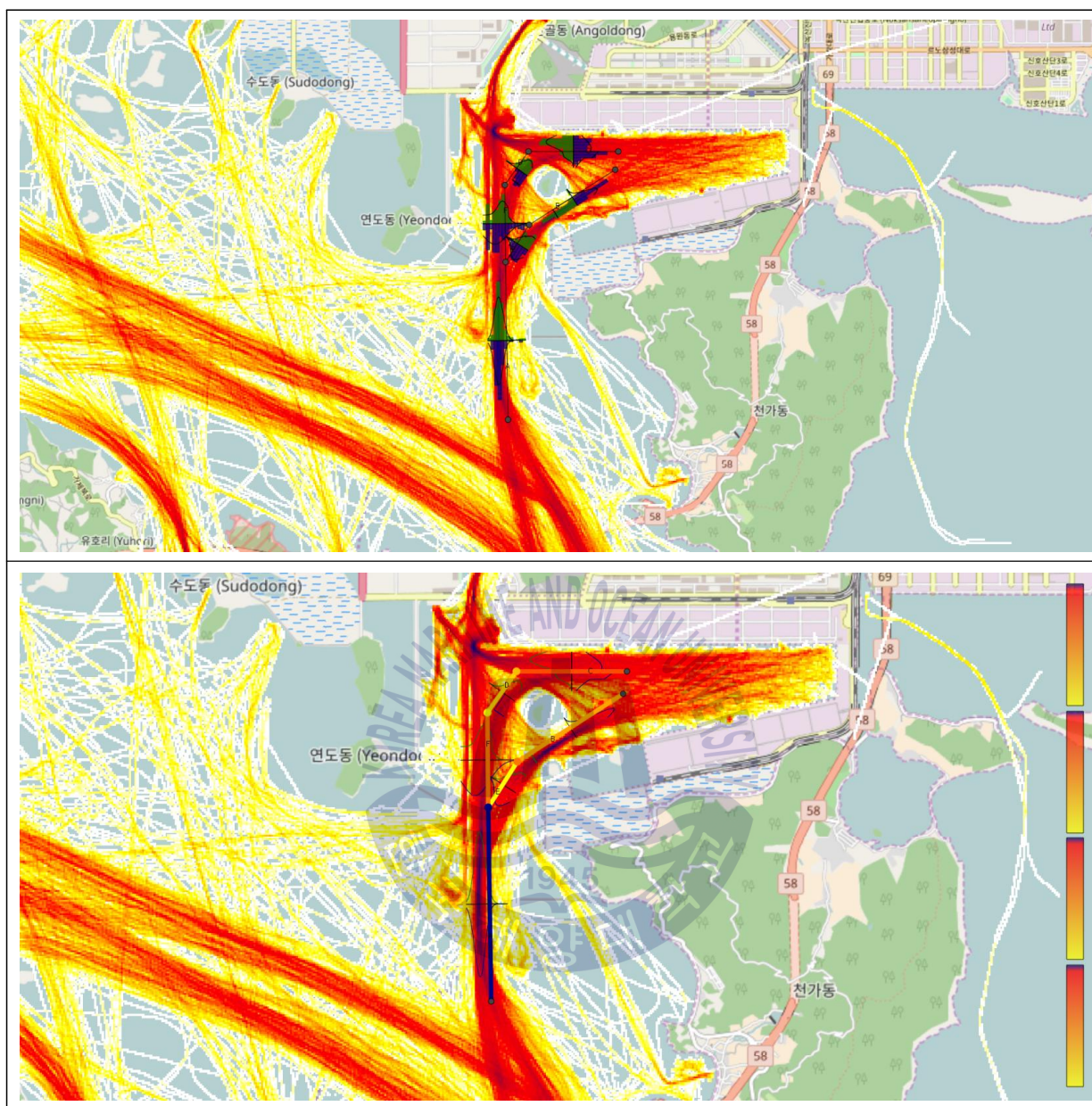


Fig. 63 Traffic data for distribution and density – Busan Newport

3.2.6 대산항

대산항은 대산항 항계선, 제1항로, 흑어도북측, 비경도서측 등 총 4개의 항로에서 IWRAP Mk2에 의한 항로 위험도를 평가하였다.

통항선박의 경우, 100m 미만의 일반화물선이 가장 많은 것으로 분석되었으며, 대산항 위험물 취급 부두를 이용하는 탱커선도 다수 통항하는 것으로 조사되었다.

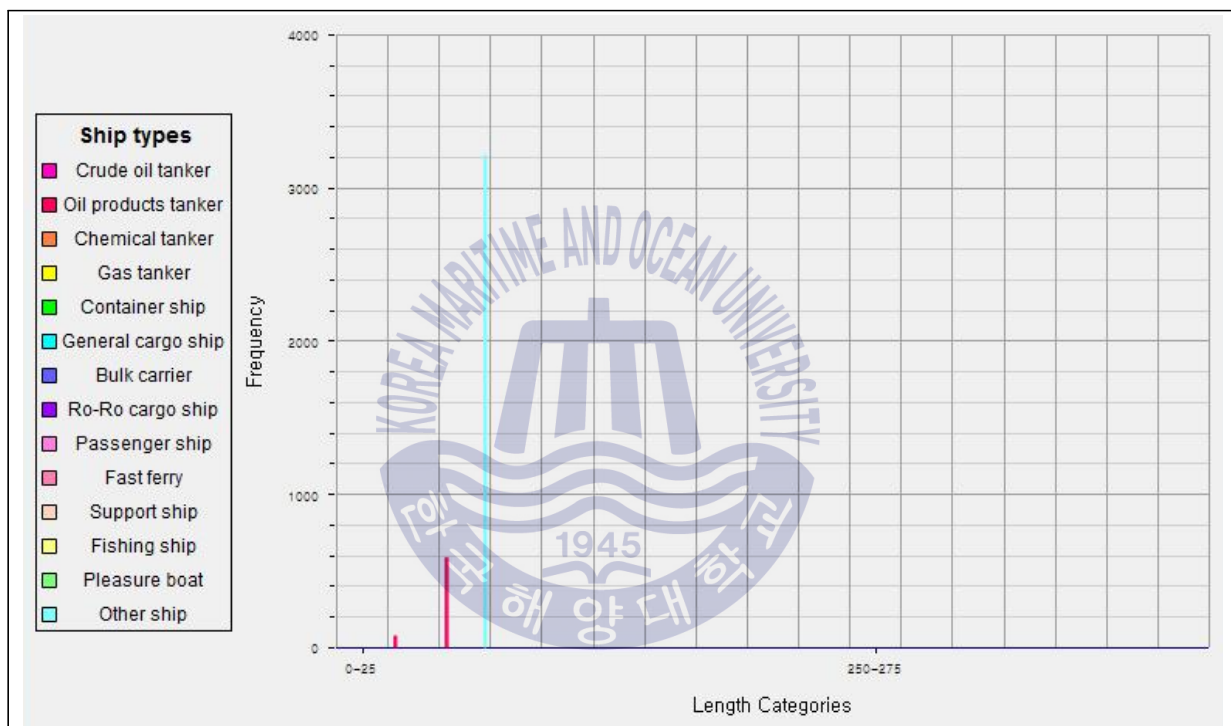


Fig. 64 Traffic Volume Distribution chart – Deasan 대산항 항계선(West bound)

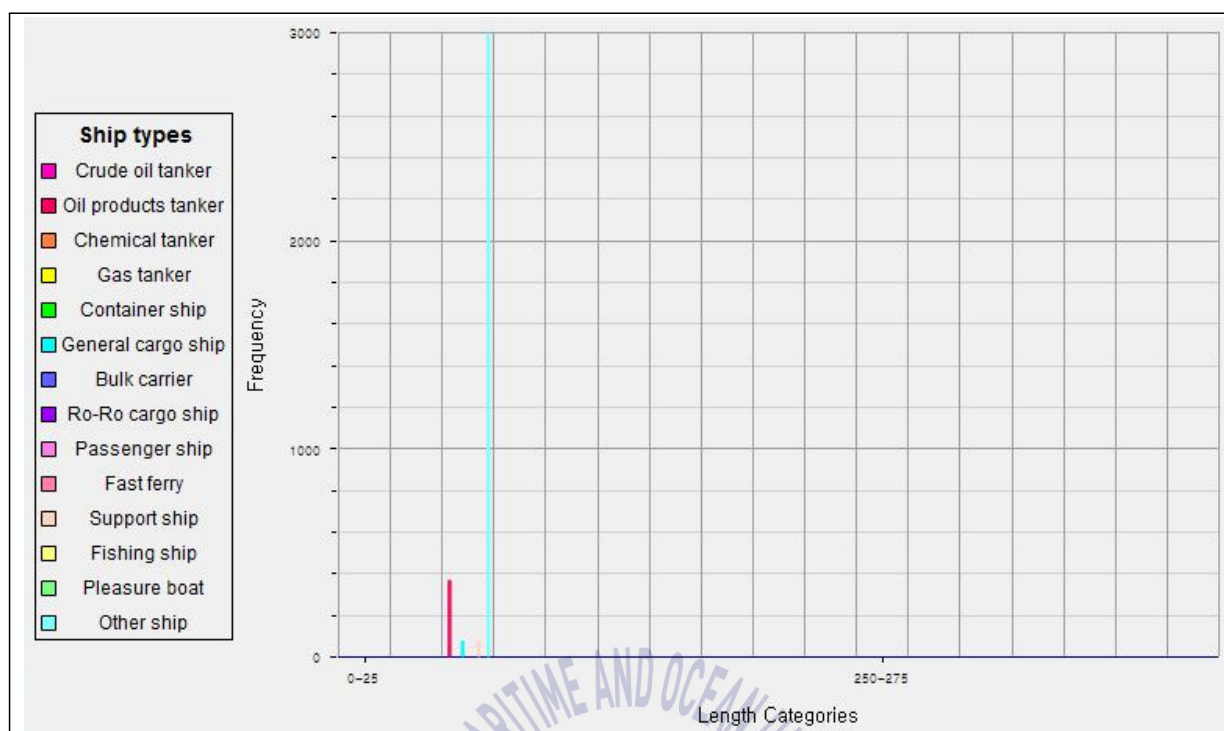


Fig. 65 Traffic Volume Distribution chart - Deasan 대산항 항계선(East bound)

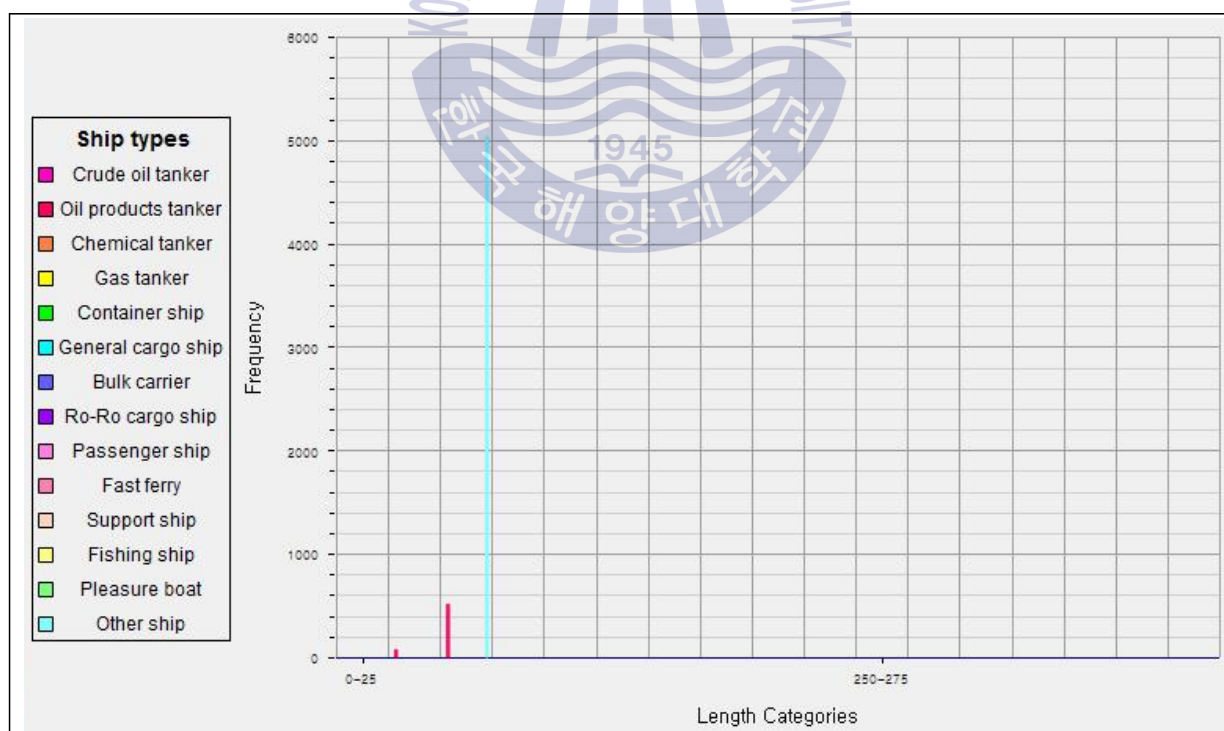


Fig. 66 Traffic Volume Distribution chart - Deasan 제1항로(West bound)

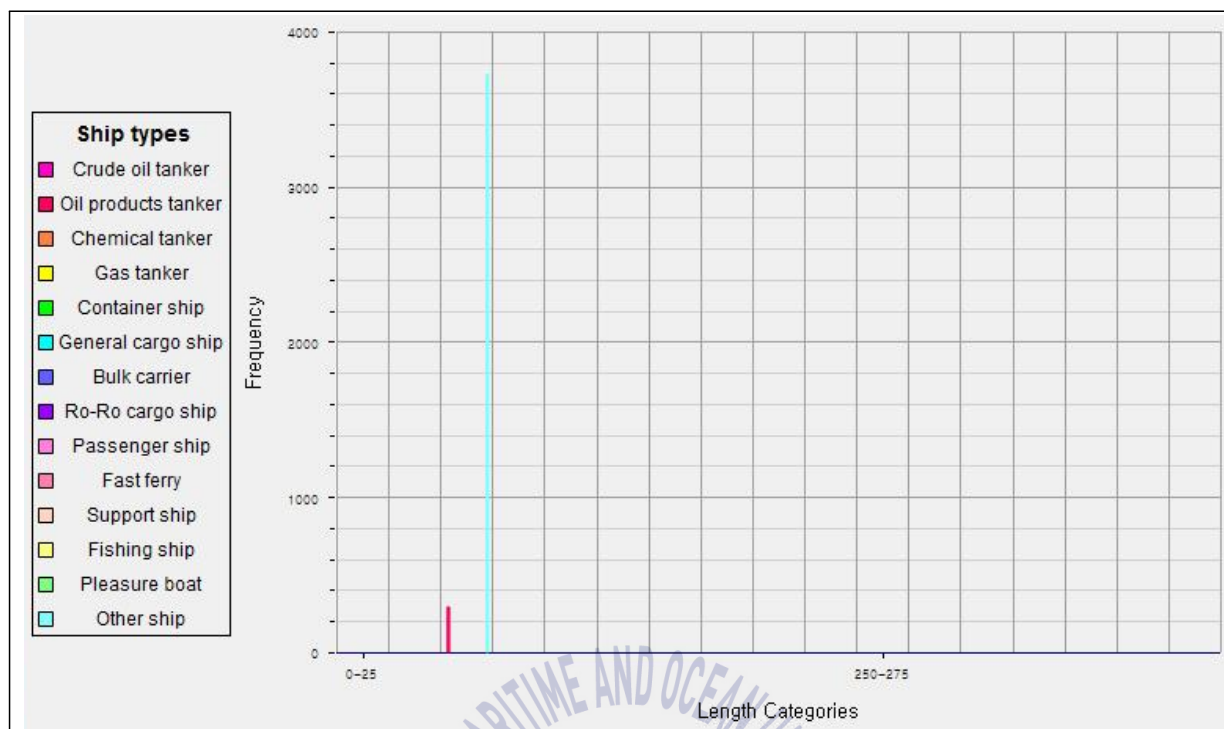


Fig. 67 Traffic Volume Distribution chart - Deasan 제1항로(East bound)

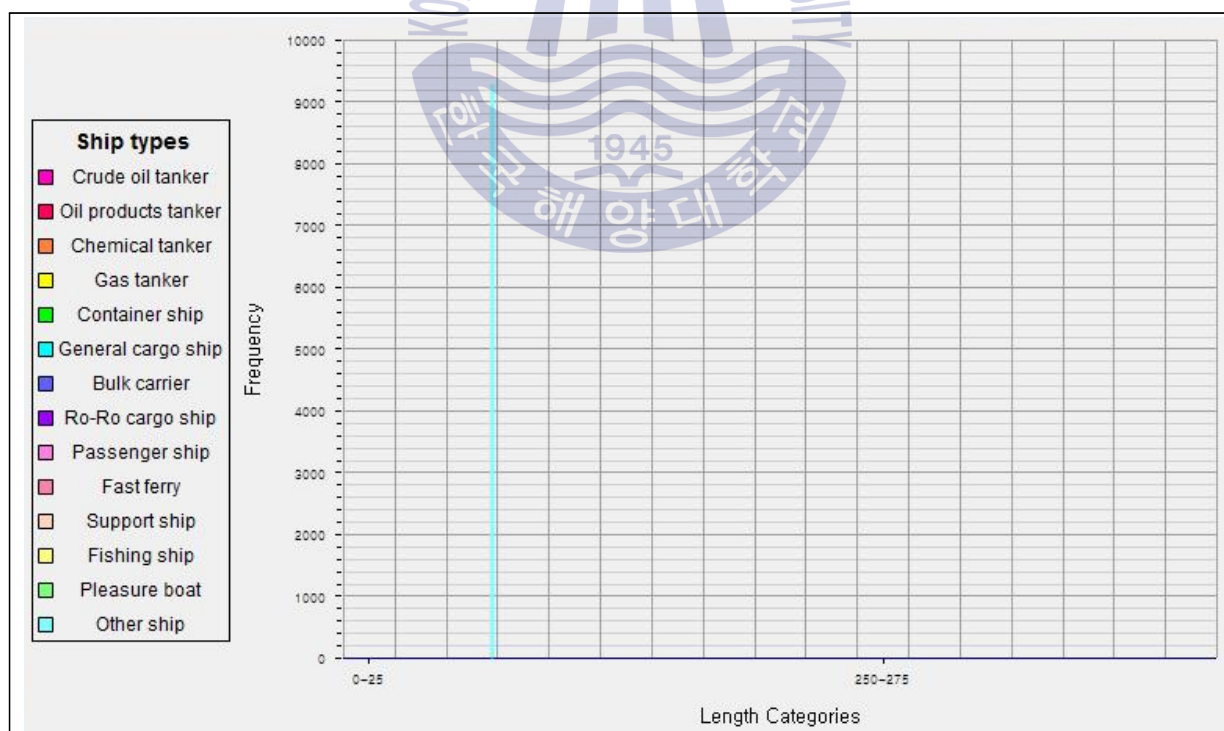


Fig. 68 Traffic Volume Distribution chart - Deasan 흑어도북측(West bound)

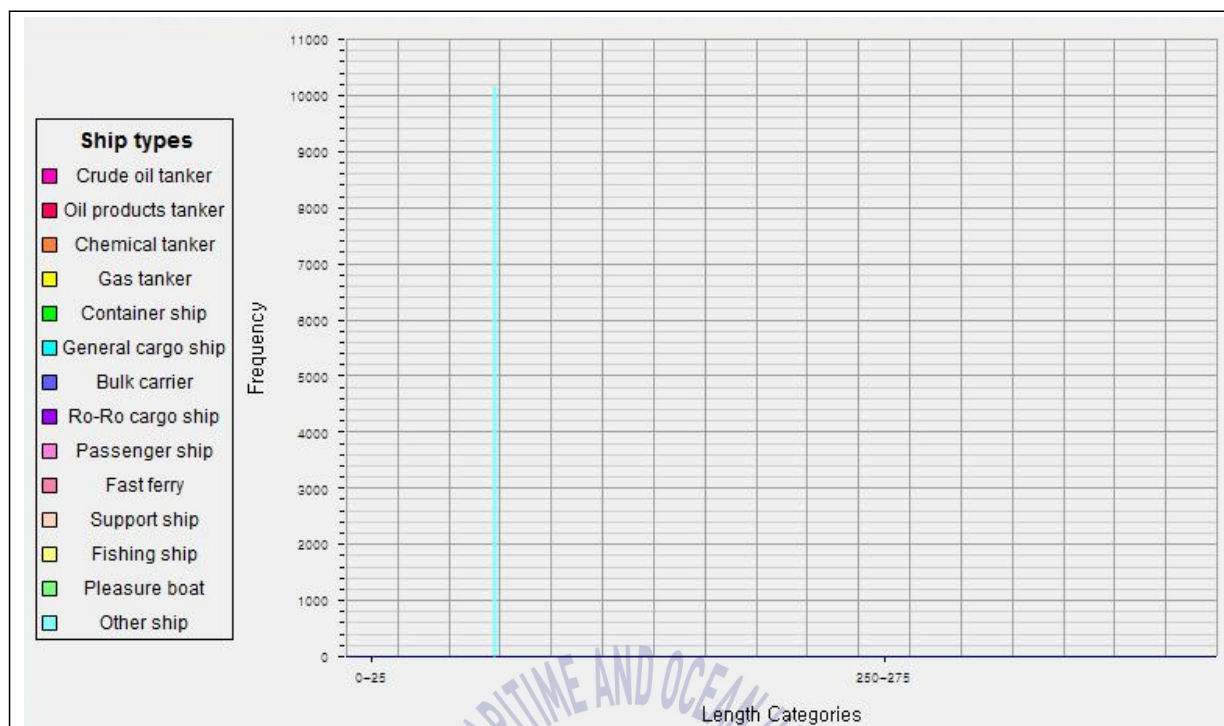


Fig. 69 Traffic Volume Distribution chart – Deasan 흑어도북측(East bound)

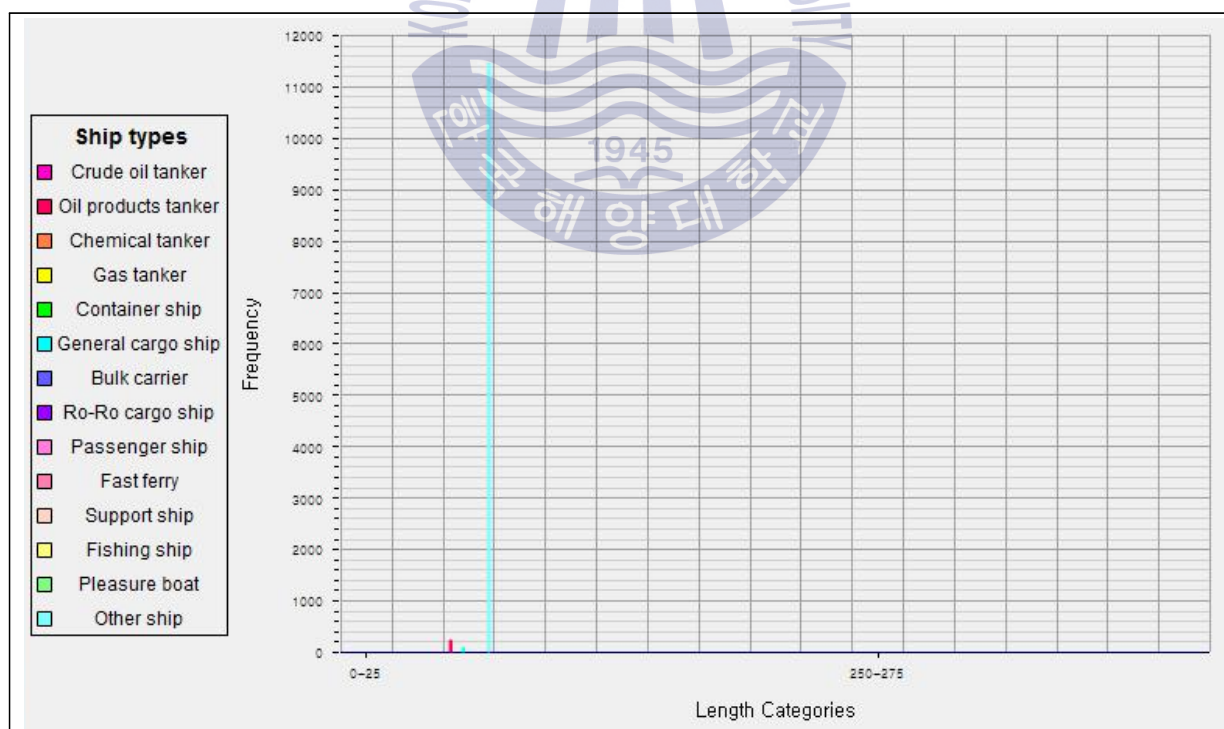


Fig. 70 Traffic Volume Distribution chart – Deasan 비경도서측(West bound)

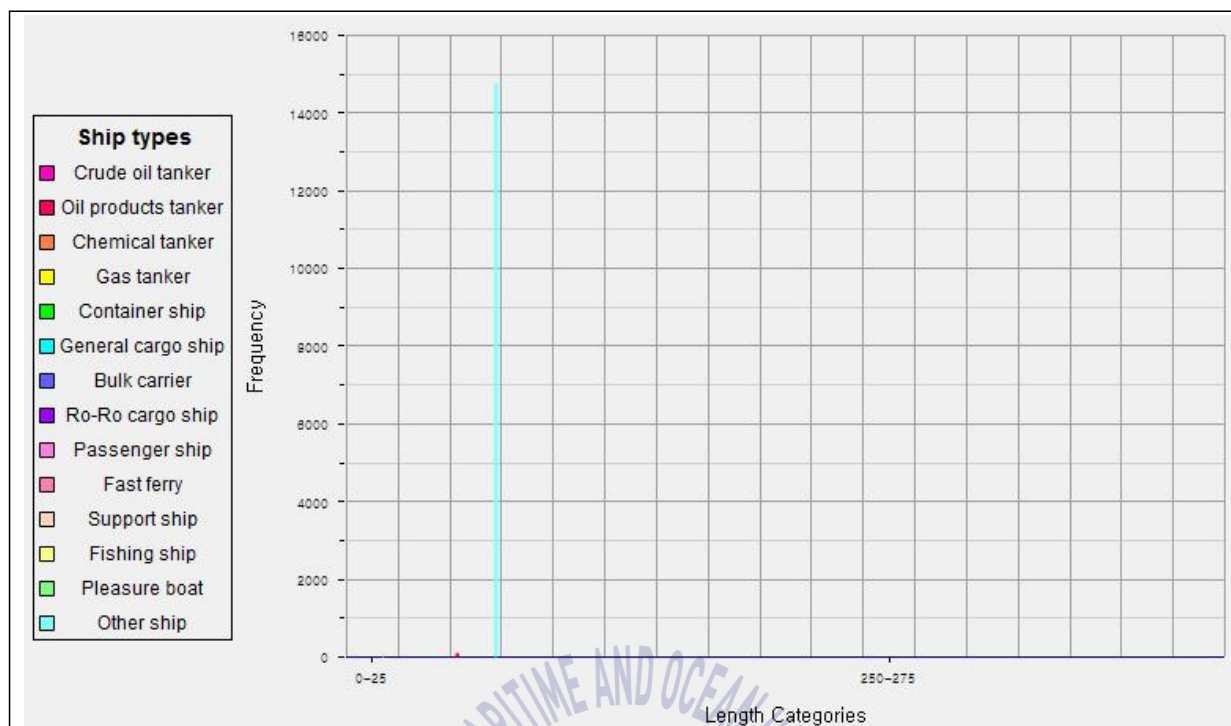


Fig. 71 Traffic Volume Distribution chart – Deasan 비경도서측(East bound)

대산항의 충돌확률은 Table 17과 같이 분석되었으며, 비경도서측에서의 일평균척수 및 충돌 확률이 가장 높은 것으로 분석되었다.

Table 17 Collision probability – Deasan

구 분	일평균척수	Head-on	Overtaking	λ_{Col}
대산항 항계선	24	0.00084	0.00002	0.00087
제1항로	37	0.00125	0.00003	0.00127
흑어도북측	16	0.00698	0.00000	0.00698
비경도서측	62	0.01329	0.00018	0.01347

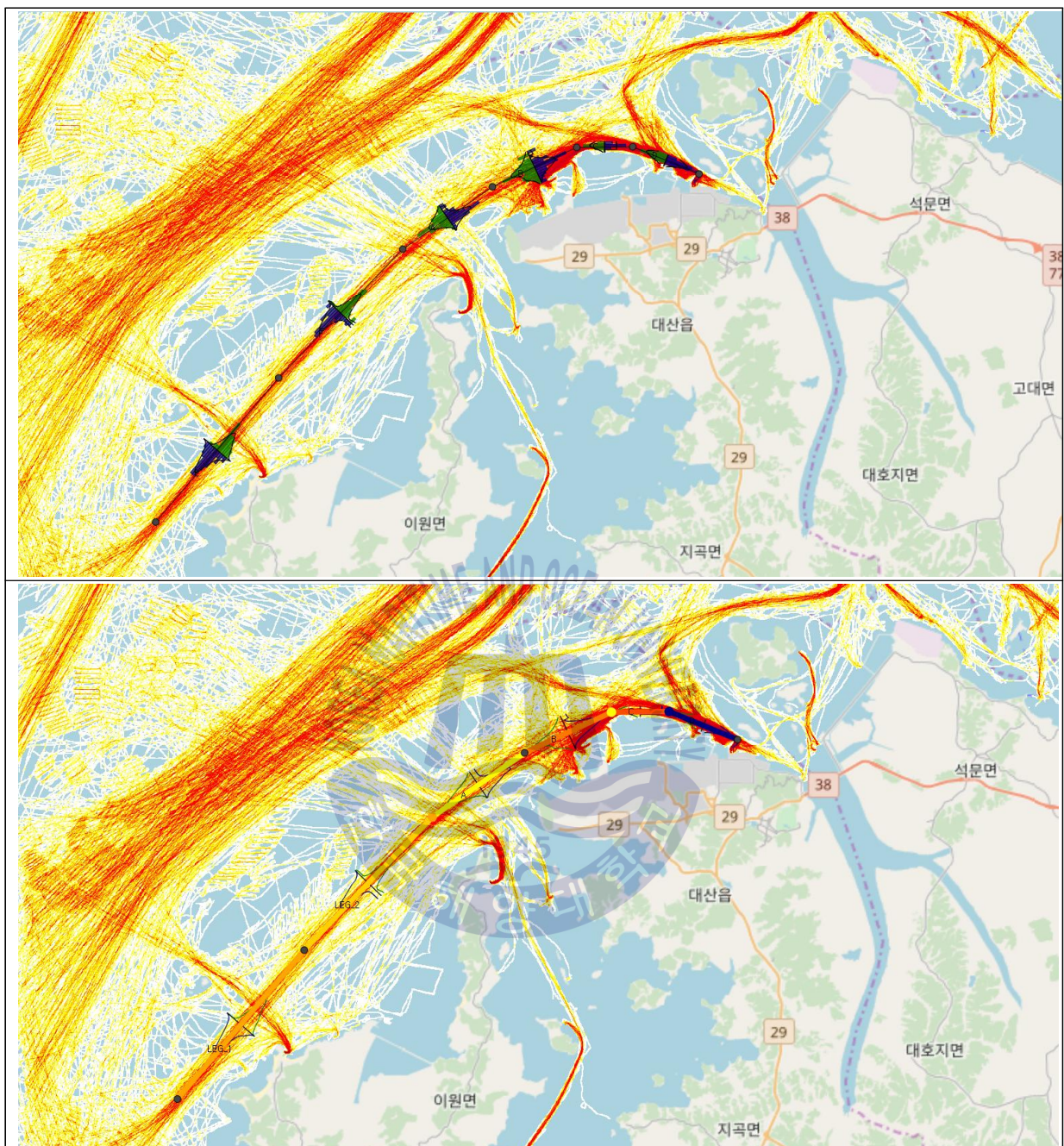


Fig. 72 Traffic data for distribution and density – Deasan

3.3 평가결과

3.3.1 항로 위험도 분석 결과

IWRAP Mk2에 의한 항로 위험도 분석 결과는 Fig. 73 및 Table 18과 같다. 대상 항로의 충돌확률 평균은 약 0.01415로 분석되었으며, 이중 Head-on 상황에서의 충돌확률 평균은 약 0.01255, Overtaking 상황에서의 충돌확률 평균은 약 0.0016으로 검토되었다. 평균값 대비 울산항 제1,2항로(0.05995)와 부산항신항 동방파제(0.05861)의 충돌확률이 가장 높은 것으로 분석되었다.

해당 결과 값은 연간 충돌확률의 값이며, 충돌확률(λ_{col})은 대상 항로에서 발생한 Head-on 상황과 Overtaking 상황에서의 충돌확률 합으로 정의하고 있다.

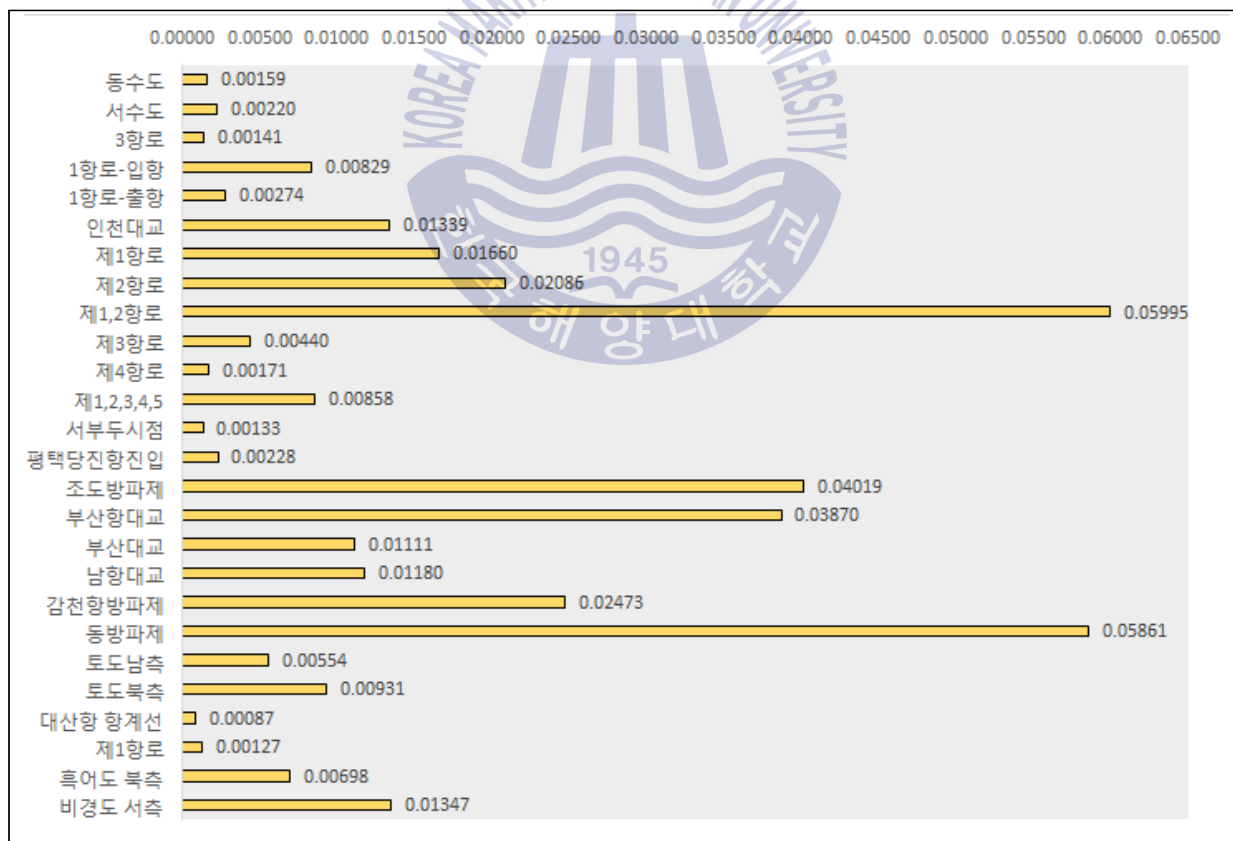


Fig. 73 Collision probability by Port waterway

Table 18 Collision probability by Port waterway

항 만	항 로	Head-on	Overtaking	λ_{Col}
인 천	동수도	0.00083	0.00076	0.00159
	서수도	0.00141	0.00079	0.00220
	3항로	0.00120	0.00020	0.00141
	1항로-입항	0.00622	0.00207	0.00829
	1항로-출항	0.00127	0.00147	0.00274
	인천대교	0.01247	0.00092	0.01339
울 산	제1항로	0.01561	0.00098	0.01660
	제2항로	0.01962	0.00124	0.02086
	제1,2항로	0.05593	0.00402	0.05995
	제3항로	0.00396	0.00044	0.00440
	제4항로	0.00151	0.00021	0.00171
	울산항진입항로	0.00773	0.00084	0.00858
평택 · 당진	진입항로	0.00206	0.00022	0.00228
	서부두 시점	0.00080	0.00053	0.00133
부 산	조도방파제	0.02872	0.01147	0.04019
	부산항대교	0.03182	0.00688	0.03870
	부산대교	0.01099	0.00012	0.01111
	남항대교	0.01157	0.00023	0.01180
	감천항방파제	0.02387	0.00085	0.02473
부산항신항	동방파제	0.05407	0.00454	0.05861
	토도남측	0.00487	0.00067	0.00554
	토도북측	0.00741	0.00190	0.00931
대 산	대산항 항계선	0.00084	0.00002	0.00087
	제1항로	0.00125	0.00003	0.00127
	흑어도북측	0.00698	0.00000	0.00698
	비경도서측	0.01329	0.00018	0.01347
평 균		0.01255	0.00160	0.01415

3.3.2 충돌확률에 영향을 주는 변수 검토

이러한 결과를 토대로 IWRAP Mk2에 의한 충돌확률에 영향을 주는 변수의 민감도를 검토하기 위해 다중회귀분석을 수행하였다.

회귀분석이란 한 변수를 종속변수로 그리고 다른 변수(들)를 독립변수로 설정하여 이들 간의 관계를 분석하는 것으로,[18] 연구자가 고려하는 개별 독립변수가 종속변수에 어느 방향으로 어느 정도 영향을 미치는가를 설명하기 위해 사용한다.[19]

다중회귀분석의 평가 기준 표는 Table 19와 같다. 본 연구에서는 주 입력요소로 고려되는 항로폭(W_{min}), 일평균교통량(P_{av}), 통행선속(S_{av})을 독립변수로 설정하고, 충돌확률(λ_{col})에 영향을 미치는 독립변수에 대하여 검토하였으며, 평가 기준표상 각 독립변수의 유의확률(P-Value) 및 표준화계수 베타(β)값만 고려하였다.

다중회귀분석 결과는 Table 20과 같으며, 유의확률의 경우, 일평균교통량(P_{av}), 항로폭(W_{min}), 통행선속(S_{av}) 순으로 유의도가 높은 것으로 분석되었다.

표준화계수 베타 값의 경우, 베타 값이 1에 가까울수록 높은 영향력을 주고, 0에 가까울수록 낮은 영향을 준다. 또한 양수면 긍정적인 영향 음수면 부적인 영향을 준다. 표준화계수 베타 값 비교 결과, 일평균교통량(P_{av}), 항로폭(W_{min}) (음수), 통행선속(S_{av}) 순으로 종속변수에 미치는 영향력이 큰 것으로 분석되었다.

독립변수 간 다중공선성 검토에서는 모든 변수의 공차한계가 0.1보다 큰 것으로 분석되어 독립변수간 과도한 상관으로 인한 추정오류는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.

Table 19 Multiple regression analysis ratings[20]

평가 지표	평가 내용	평가 기준
R^2 결정계수	<ul style="list-style-type: none"> 회귀모형의 설명력을 판단 	<ul style="list-style-type: none"> 보통은 0.4 이상이나 사회과학 연구에서 0.2 이상만 되어도 설명력이 높은 것으로 판단[21]
F 통계량의 유의확률	<ul style="list-style-type: none"> 회귀모형의 통계적 유의함을 판단 	<ul style="list-style-type: none"> 0.05 이하인 경우 통계적으로 유의한 것으로 판단
각 독립변수의 유의확률 (P-Value)	<ul style="list-style-type: none"> 종속변수에 의미 있는 영향을 미치는 독립변수는 무엇인지 판단 	<ul style="list-style-type: none"> 0.05보다 작은 경우 의미 있는 영향을 미치는 변수임을 판단 0.05 보다 큰 경우 의미 있는 영향을 미치는 변수가 아님을 판단
표준화계수 베타(β)	<ul style="list-style-type: none"> 종속변수에 영향을 미치는 독립변수들의 상대적 영향력을 파악 	<ul style="list-style-type: none"> 베타 값이 클수록 상대적인 영향력이 커짐을 나타냄 베타 값이 양수이면 독립변수가 증가 할수록 영향력이 커짐을 나타냄 베타 값이 음수이면 독립변수가 감소할수록 영향력이 커짐을 나타냄

Table 20 Independent Variables Affecting Dependent Variables

모 형		비표준화 계수		표준화 계수	t	유의 확률	공선성 통계량	
		B	표준오차	베타			공차	VIF
λ Col	(상수)	-.003	.014		-.219	.829		
	W_{\min}	-4.293E-6	.000	-.080	-.541	.594	.835	1.198
	P_{av}	.000	.000	.743	5.134	.000***	.873	1.145
	S_{av}	.000	.001	.016	.114	.910	.948	1.055
$p^* < 0.1$, $p^{**} < 0.05$, $p^{***} < 0.01$								

또한 각 변수와 충돌확률(λ_{col})의 산포도를 작성하여, 경향을 파악하고자 하였다. 분석결과, 일평균교통량(P_{av})이 많으면 충돌확률이 높아지는 경향을 볼 수 있으며, 항로폭(W_{\min})의 경우, 항로폭이 넓을수록 충돌확률은 낮아지는 경향을 볼 수 있었다.

통항선속(S_{av})의 경우, 국내 주요 항만 및 항로에서 주로 통항하는 선속인 약 10~11 knots 사이에서 충돌확률이 가장 높은 것으로 분석되었다. 이는 항만의 규정 또는 여건 등으로 해당 선속을 유지하고자 하는 운항자의 의도 즉, 기타 변수(항만의 환경 및 운항 습관 등)로 작용할 수 있는 요소가 반영되어 있는 것으로 판단된다.

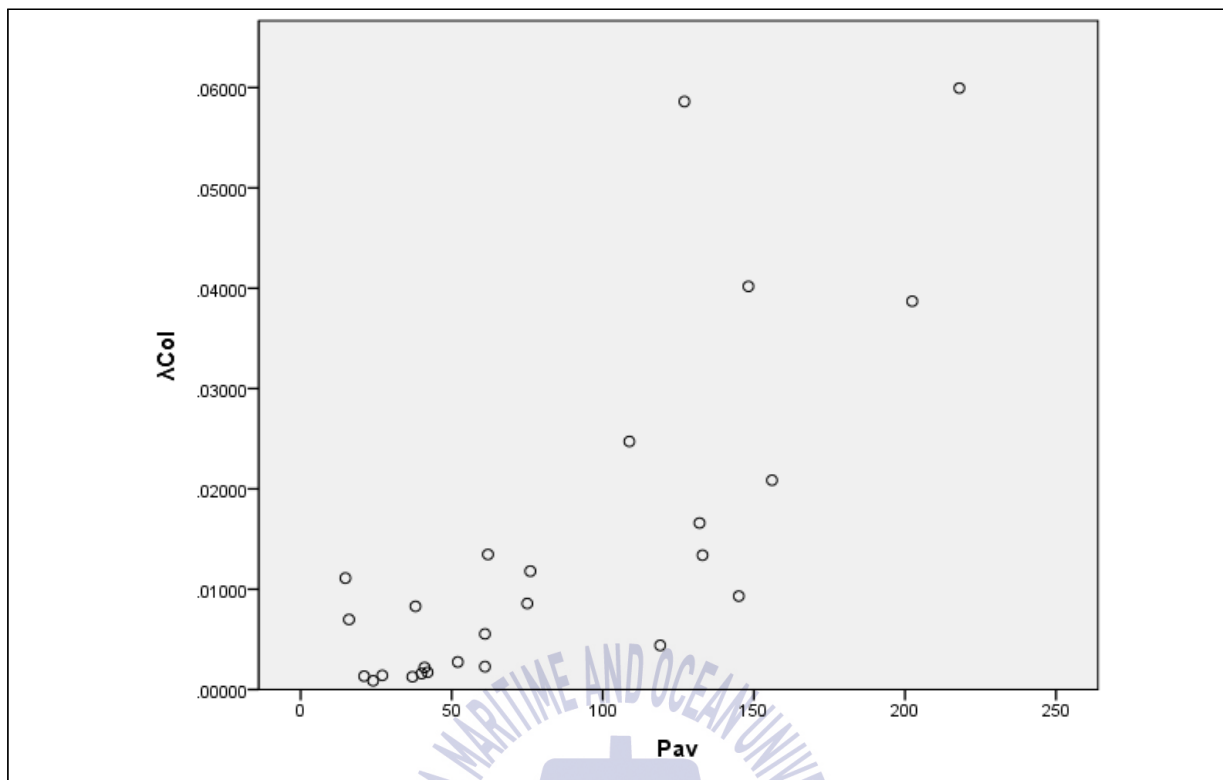


Fig. 74 Dairy average traffic volume – Collision probability

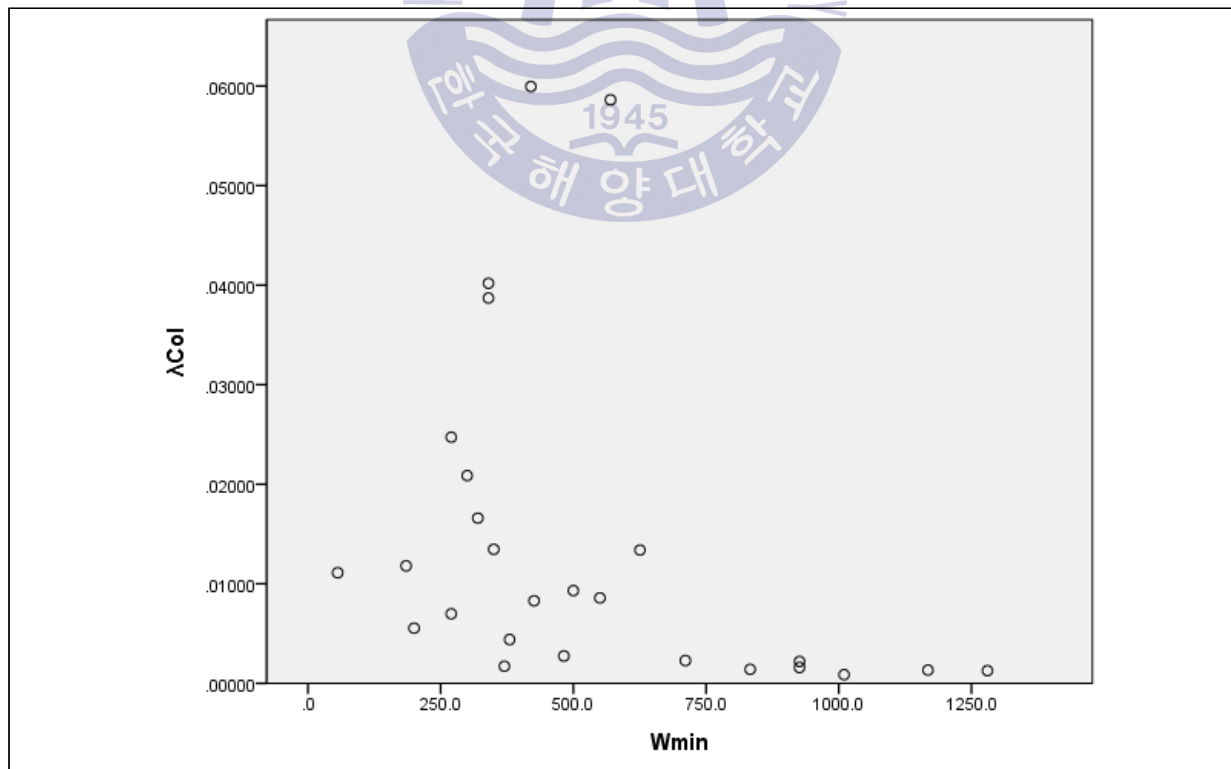


Fig. 75 Port waterway width – Collision probability

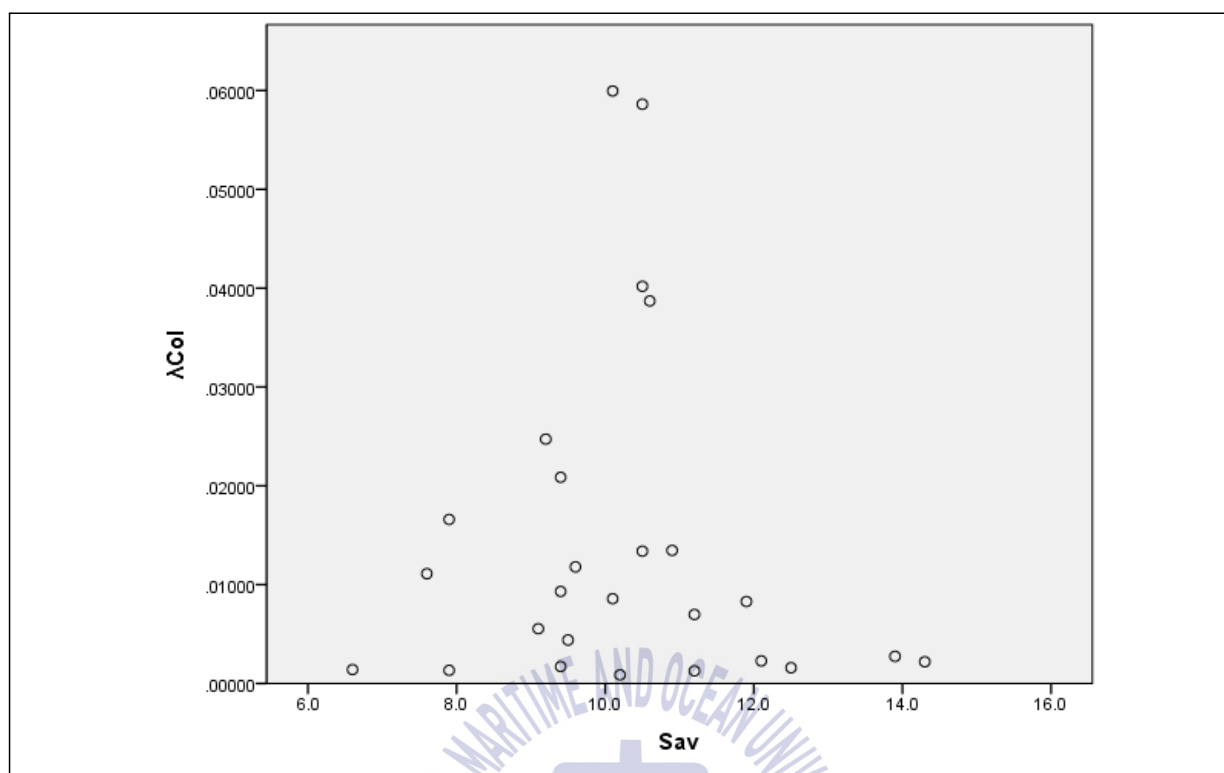
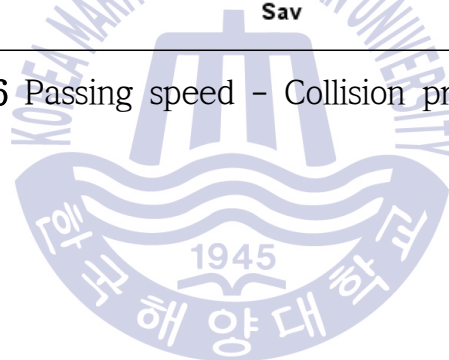


Fig. 76 Passing speed - Collision probability



제 4 장 해상교통혼잡도를 기반 항로 혼잡도

4.1 대상 항로 설정 및 기본사항 입력

대상 항로 설정의 경우, IWRAP Mk2에서 설정한 항로(총 26개)와 같으며, 대상 항로가 모두 항만진입수로인 점을 고려하여 좁은 수로 및 항내에서의 점유영역을 적용하였다. 또한 표준선박 대비 환산계수인 L^2 을 이용하여 해상교통량을 계산하였다.

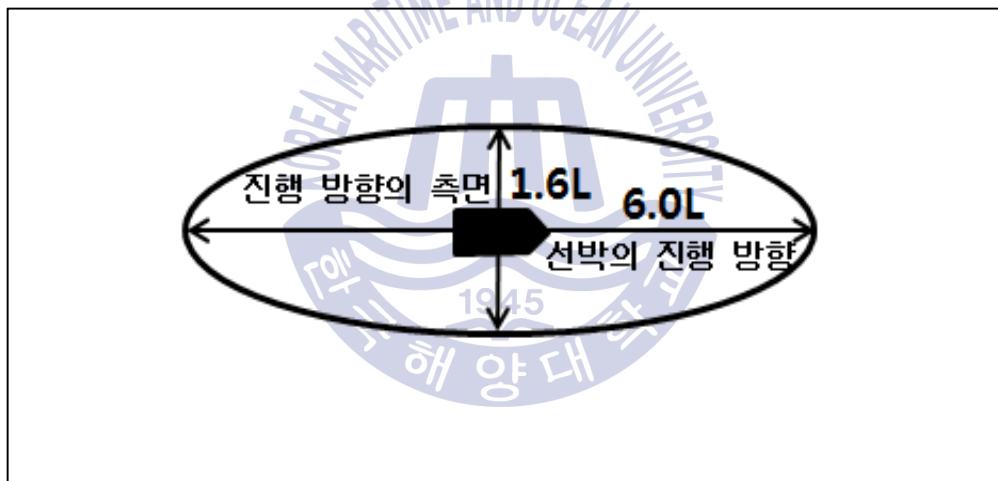


Fig. 77 Ship's Domain in narrow Waterway and port

4.1.1 항로폭 설정

항로폭 설정은 IWRAP Mk2에서 설정한 Leg의 항로폭과 동일하게 설정하였다. 해상교통혼잡도에서의 항로폭은 항로의 수용능력을 결정하기 때문에 실제 평가 시에는 보수적인 평가를 위하여 대상 항로의 최소 항로폭을 입력하는 것이 일반적이다. 본 연구에서 혼잡도 분석을 위하여 측정한 항로폭 지점은 Fig. 78과 같으며, 항로폭 검토 결과는 Fig. 79와 같다.

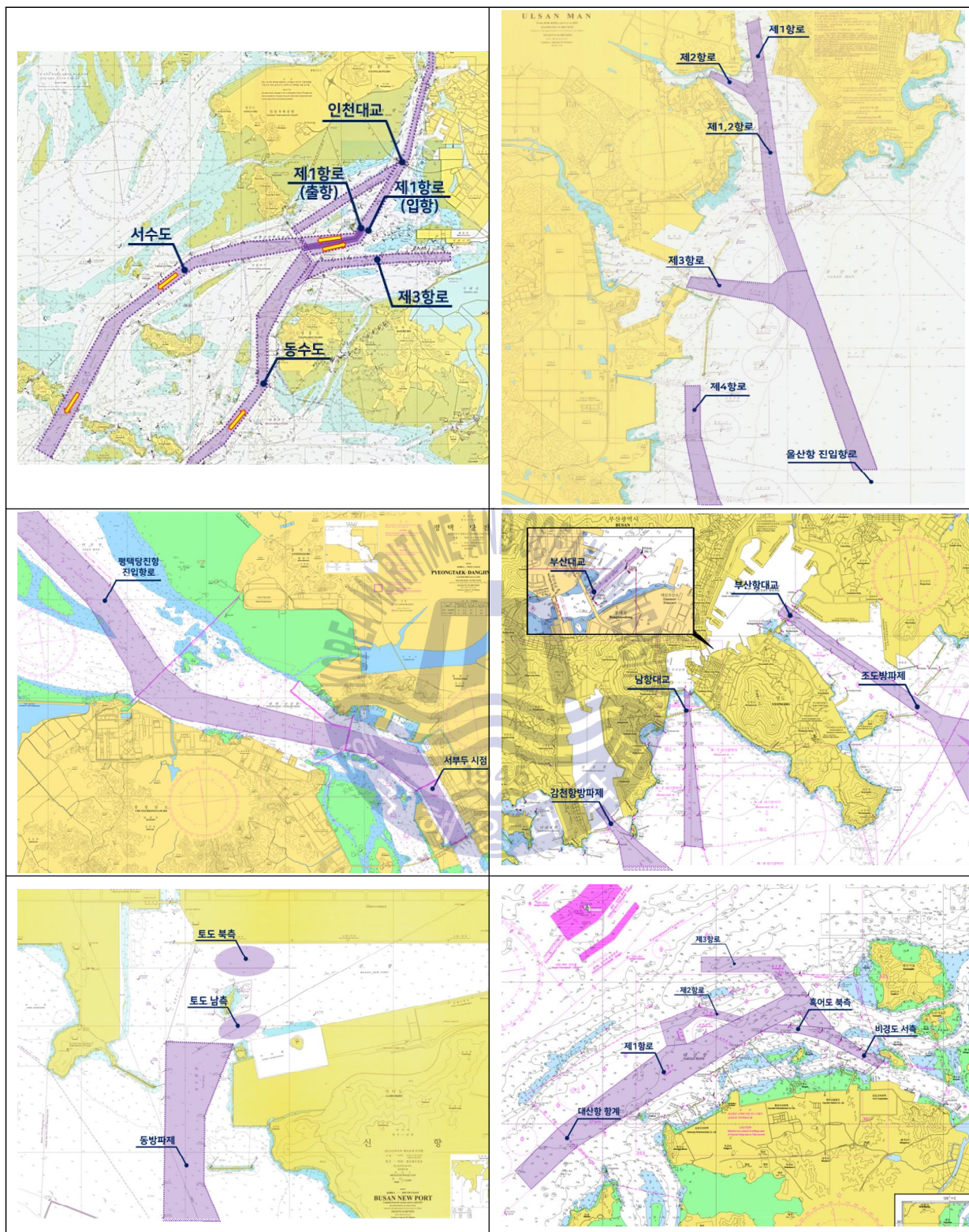


Fig. 78 Marine traffic congestion measurement point

국내 주요 26개 항로의 항로폭 검토결과, 평균 항로폭은 약 531m로 분석되었다. 전반적으로 평균 항로폭 대비 평택·당진항 및 대산항의 항로폭이 상대적으로 넓은 반면, 교통량이 많은 울산항 및 부산항의 항로폭은 상대적으로 좁은 것으로 검토되었다.

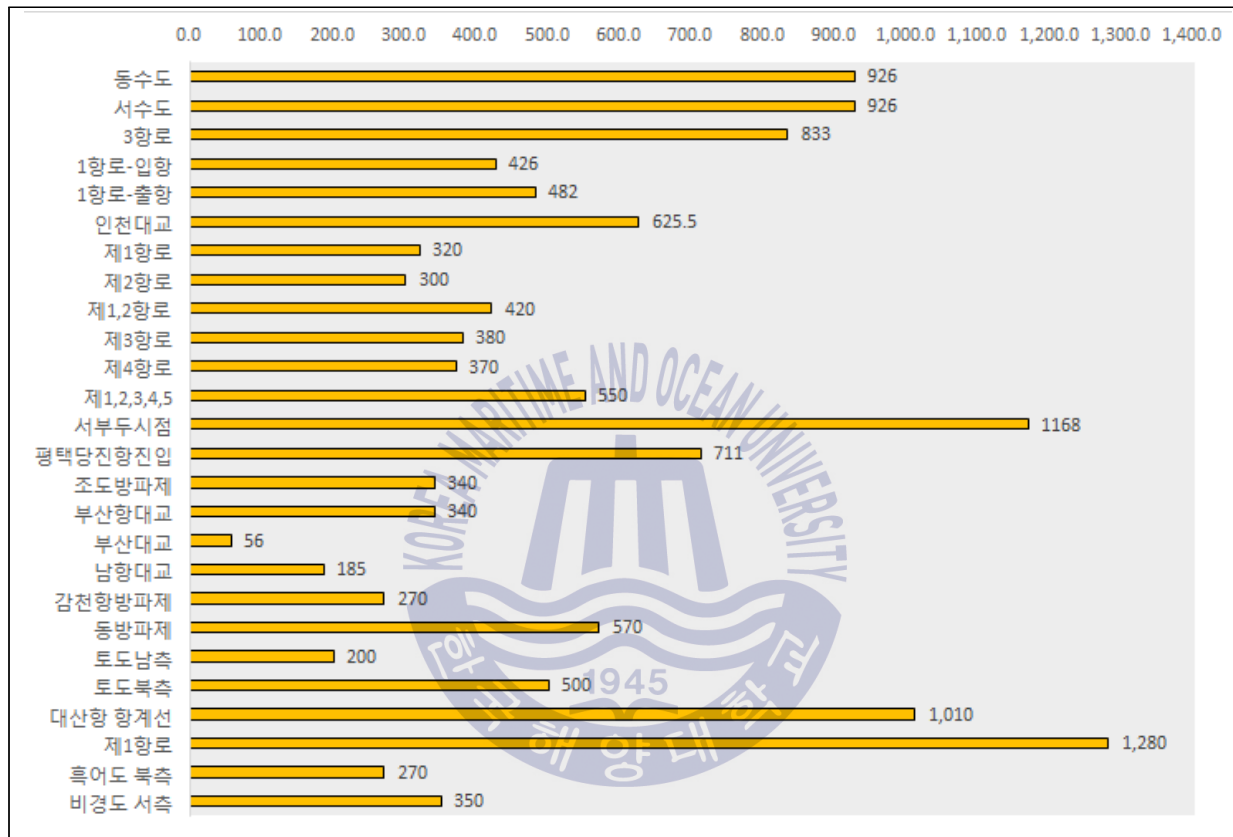


Fig. 79 Status for Port waterway width

4.1.2 통항선속 입력

통항선속은 GICOMS Data상에 측정된 속력을 평균하여 입력하였으며, 항로별 항로폭 및 통항선속은 Table 21 및 Fig. 80과 같다.

Table 21 Status for Port waterway width and Average speed

항 만	항 로	항로폭(m)	통항선속(kts)
인 천	동수도	926.0	12.5
	서수도	926.0	14.3
	3항로	833.0	6.6
	1항로-입항	426.0	11.9
	1항로-출항	482.0	13.9
	인천대교	625.5	10.5
울 산	제1항로	320.0	7.9
	제2항로	300.0	9.4
	제1,2항로	420.0	10.1
	제3항로	380.0	9.5
	제4항로	370.0	9.4
	제1,2,3,4,5	550.0	10.1
평택 · 당진	진입항로	1,168.0	12.1
	서부두 시점	711.0	7.9
부 산	조도방파제	340.0	10.5
	부산항대교	340.0	10.6
	부산대교	56.0	7.6
	남항대교	185.0	9.6
	감천항방파제	270.0	9.2
부산항신항	동방파제	570.0	10.5
	토도남측	200.0	9.1
	토도북측	500.0	9.4
대 산	대산항 항계선	1,010.0	10.2
	제1항로	1,280.0	11.2
	흑어도북측	270.0	11.2
	비경도서측	350.0	10.9
평 균		531.1	10.2

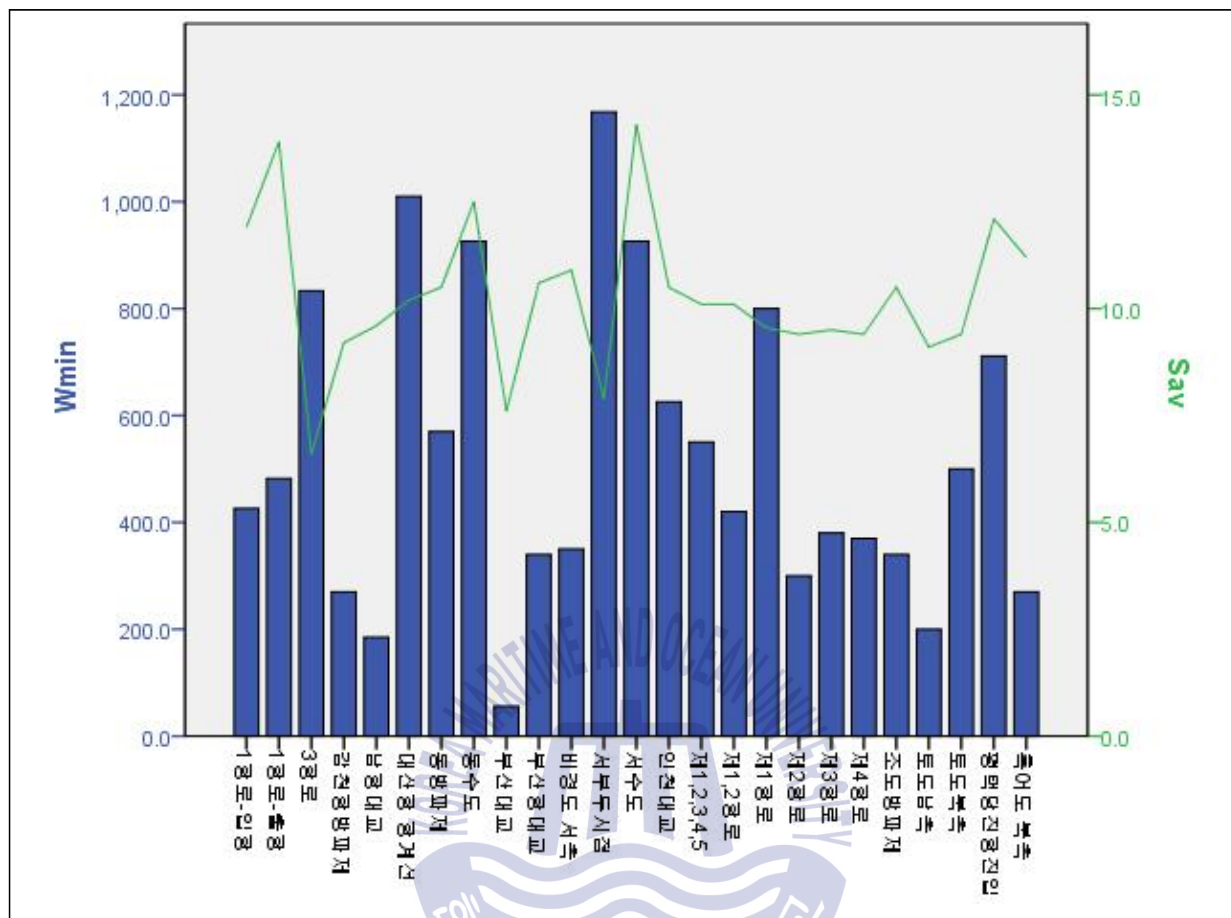


Fig. 80 Status for Port waterway width and Passing speed

4.2 해상교통혼잡도에 의한 항로 혼잡도 분석

4.2.1 인천항

인천항은 총 6개의 지점에서 해상교통혼잡도를 평가하였다. 인천항의 경우, 항로폭이 충분하고, 동수도 및 서수도와 같이 선박의 입항 및 출항이 구분되거나, 통항분리대가 지정되어 있어 주로 편도통항이 이루어지기 때문에 평균 해상교통혼잡도가 그리 높지 않은 것으로 평가되었다.

해상교통혼잡도 분석결과, 인천대교의 해상교통혼잡도가 가장 높은 것으로 분석되었다.

Table 22 Result of Marine traffic congestion - Incheon

구 분	항로폭(m)	통항선속(kts)	C_A	C_P
동수도	926	12.5	5.4%	50.2%
서수도	926	14.3	4.0%	21.7%
제3항로	833	6.6	4.3%	39.1%
제1항로(입항)	426	11.9	9.3%	57.3%
제1항로(출항)	482	13.9	7.4%	37.4%
인천대교	626	10.5	14.3%	58.9%

4.2.2 울산항

울산항은 총 6개의 지점에서 해상교통혼잡도를 평가하였다. 울산항은 제1항로, 제2항로, 제3항로, 제4항로가 운영 중에 있으며, 본 연구에서는 제1~4항로와 더불어, 제1항로와 제2항로가 합류되는 지점인 제1,2항로 및 해상교통이 가장 많이 집중되는 울산진입항로에서의 해상교통혼잡도를 분석하였다.

해상교통혼잡도 분석결과, 제1항로 및 제2항로의 합류지점인 제1,2항로의 해상교통혼잡도가 가장 높은 것으로 분석되었다.

Table 23 Result of Marine traffic congestion - Ulsan

구 분	항로폭(m)	통항선속(kts)	C_A	C_P
제1항로	320	7.9	27.3%	91.2%
제2항로	300	9.4	12.6%	120.0%
제1,2항로	420	10.1	36.5%	206.8%
제3항로	380	9.5	16.2%	102.9%
제4항로	370	9.4	5.7%	41.6%
울산진입항로	550	10.1	15.5%	102.0%

4.2.3 평택 · 당진항

평택 · 당진항은 총 2개의 지점에서 해상교통혼잡도를 평가하였다. 평택 · 당진항의 항로는 입파도 북측에서부터 내항의 평택 · 당진항 국제여객부두 건설 예정지 전면수역까지 이어져 있다.

해상교통혼잡도 분석결과, 진입항로 및 서부두 시점에서 혼잡도가 약 10% 이하로 전반적으로 해상교통흐름이 원활한 것으로 분석되었다.

Table 24 Result of Marine traffic congestion - Pyongteak · Dangjin

구 분	항로폭(m)	통항선속(kts)	C_A	C_P
진입항로	1,168	12.1	7.3%	44.9%
서부두 시점	711	7.9	10.0%	72.8%

4.2.4 부산항

부산항은 총 6개의 지점에서 해상교통혼잡도를 평가하였다. 부산항 항로의 경우, 제1항로(부산항로), 제2항로(남외항로), 제3항로(감천항로), 제4항로(북내항로), 제5항로(신항항로)로 구분되어 있으며, 진입수로에 따라 북항, 남항, 감천항으로

구분된다. 북항으로 진입하기 위해서는 조도방파제 및 부산항대교를 통과해야 하며, 남항의 경우, 남항대교 및 남항방파제, 감천항의 경우 감천항방파제를 통과해야 한다.

해상교통혼잡도 분석결과, 조도방파제에서의 해상교통혼잡도가 가장 높은 것으로 분석되었다,

Table 25 Result of Marine traffic congestion - Busan

구 분	항로폭(m)	통항선속(kts)	C_A	C_P
조도방파제	340	10.5	66.3%	361.1%
부산항대교	340	10.6	40.3%	192.9%
부산대교	56	7.6	6.1%	101.7%
남항대교	185	9.6	7.2%	232.8%
감천항방파제	270	9.2	24.6%	205.2%

4.2.5 부산항신항

부산항신항은 총 3개의 지점에서 해상교통혼잡도를 평가하였다. 부산항 신항의 경우, 항내에 섬(토도)이 위치하고 있으며, 부산항 신항을 이용하는 선박은 통상적으로 토도 남측을 입항항로, 토도 북측을 출항항로로 통항하고 있다.

토도남측 및 토도북측은 항내 수역이지만, 대형선박이 통항하는 주요 지점이므로 해상교통혼잡도 측정지점으로 선택하였으며, GICOMS Data 분석일 당시 부산항 신항 중심준설 공사로 인하여 토도남측의 실제 가항수역이 약 200m로 기존보다 협소한 점을 고려하였다.

해상교통혼잡도 분석결과, 동방파제에서 해상교통혼잡도가 가장 큰 것으로 분석되었으며, 초대형 컨테이너선이 이용하는 부산항 신항의 특성을 보여준다.

Table 26 Result of Marine traffic congestion - Busan New Port

구 분	항로폭(m)	통항선속(kts)	C_A	C_P
동방과제	570	10.5	55.9%	146.5%
토도남측	200	9.1	35.8%	248.5%
토도북측	500	9.4	48.1	168.7%

4.2.6 대산항

대산항은 총 4개의 지점에서 해상교통혼잡도를 평가하였다. 대산항의 경우, 항계 내에 제1항로 및 제2항로, 제3항로가 있으며 항계 밖에는 제1항로 끝단부터 신도 부근까지 신도항로가 있다.

대산항은 선박통항량이 많지 않고, 항로폭 또한 충분히 확보가 되어 타 항만에 비하여 해상교통혼잡도가 그리 높지 않은 것으로 평가되었으며, 해상교통혼잡도 분석결과, 대산항 항계선에서의 해상교통혼잡도가 가장 높은 것으로 분석되었다.

또한 대산항 항계 내 2항로와 3항로는 통항선박이 적고 해상교통혼잡도 분석결과 약 1%내외로 분석되어 유의한 결과를 얻기 힘들어서 결과에서 제외하였다.

Table 27 Result of Marine traffic congestion - Deasan

구 분	항로폭(m)	통항선속(kts)	C_A	C_P
대산항 항계선	1,010	10.2	8.6%	100.7%
제1항로	1,280	11.2	3.0%	61.3%
흑어도북측	270	11.2	4.4%	62.7%
비경도서측	350	10.9	2.9%	15.9%

4.3 평가 결과

4.3.1 항로 혼잡도 분석 결과

해상교통혼잡도에 의한 항로 해상교통혼잡도(C_A) 및 최대 해상교통혼잡도(C_P) 분석 결과, 해상교통혼잡도(C_A) 평균은 약 18.4%, 최대 해상교통혼잡도(C_P) 평균은 약 113.3%로 검토되었다.

평균값 대비 부산항 조도방파제의 C_A 및 C_P 가 가장 높은 것으로 분석되었으며, 이는 부산항 조도방파제 항로는 혼잡한 상황이 자주 발생하고, 이로 인하여 사고 발생 개연성이 타 항로보다 높다는 의미로 해상교통안전진단에서 해석하고 있다.

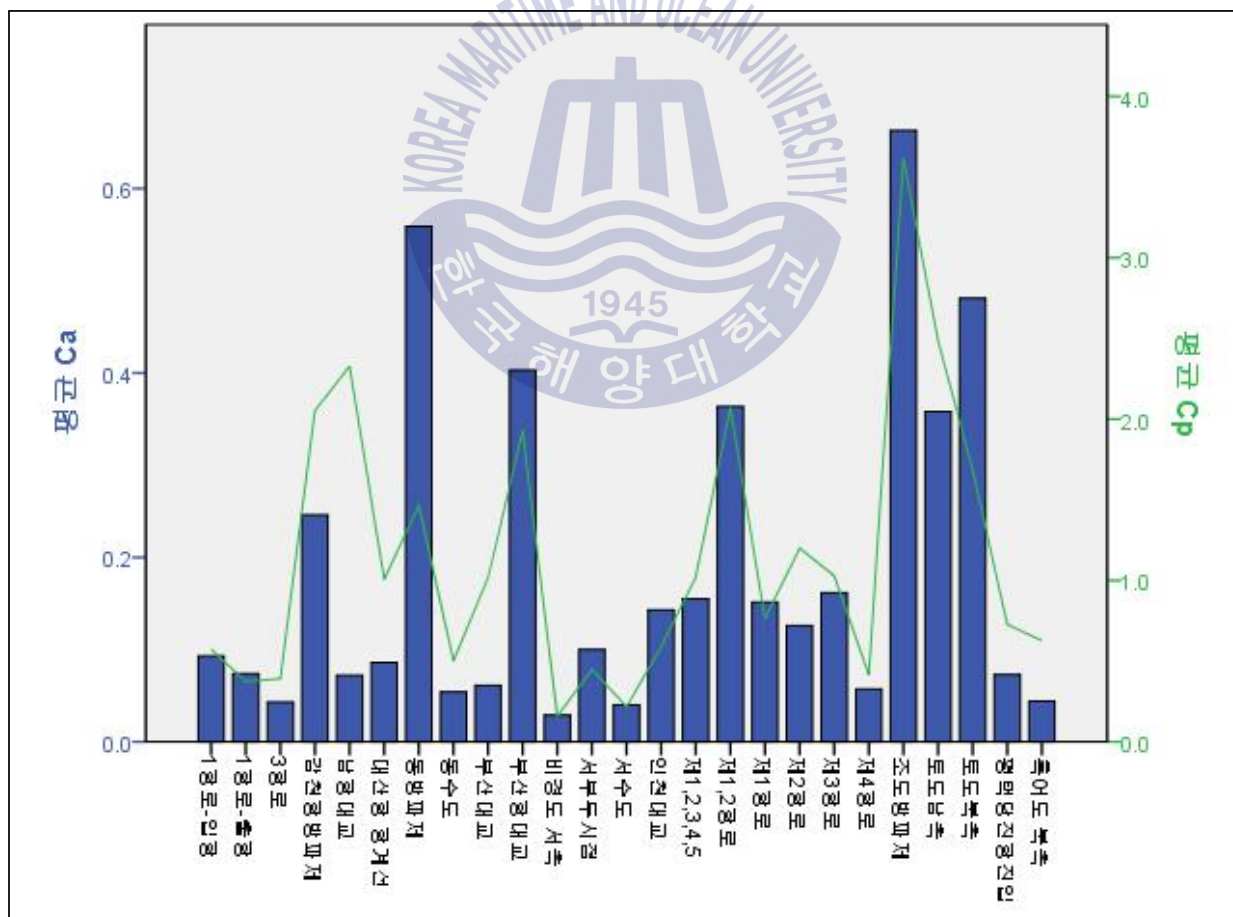


Fig. 81 Result of Average marine traffic congestion and Peak marine traffic congestion

Table 28 Result of Average marine traffic congestion and Peak marine traffic congestion

항 만	항 로	C_A	C_P
인 천	동수도	5.4%	50.2%
	서수도	4.0%	21.7%
	3항로	4.3%	39.1%
	1항로-입항	9.3%	57.3%
	1항로-출항	7.4%	37.4%
	인천대교	14.3%	58.9%
울 산	제1항로	27.3%	91.2%
	제2항로	12.6%	120.0%
	제1,2항로	36.4%	206.8%
	제3항로	16.2%	102.9%
	제4항로	5.7%	41.6%
	제1,2,3,4,5	15.5%	102.0%
평택 · 당진	진입항로	7.3%	44.9%
	서부두 시점	10.0%	72.8%
부 산	조도방파제	66.3%	361.1%
	부산항대교	40.3%	192.9%
	부산대교	6.1%	101.7%
	남항대교	7.2%	232.8%
	감천항방파제	24.6%	205.2%
부산항신항	동방파제	55.9%	146.5%
	토도남측	35.8%	248.5%
	토도북측	48.1%	168.7%
대 산	대산항 항계선	8.6%	100.7%
	제1항로	3.0%	61.3%
	흑어도북측	4.4%	62.7%
	비경도서측	2.9%	15.9%
평 균		18.4%	113.3%

또한 국내 주요 항로에서의 해상교통혼잡도(C_A) 및 최대 해상교통혼잡도(C_P) 연관성 분석 결과, C_A 값이 높을수록 C_P 값도 높아지는 특성을 보이는 것으로 분석되었으며, 항만별 C_A 와 C_P 는 평균적으로 약 7배의 차이를 보이는 것으로 분석되었다.

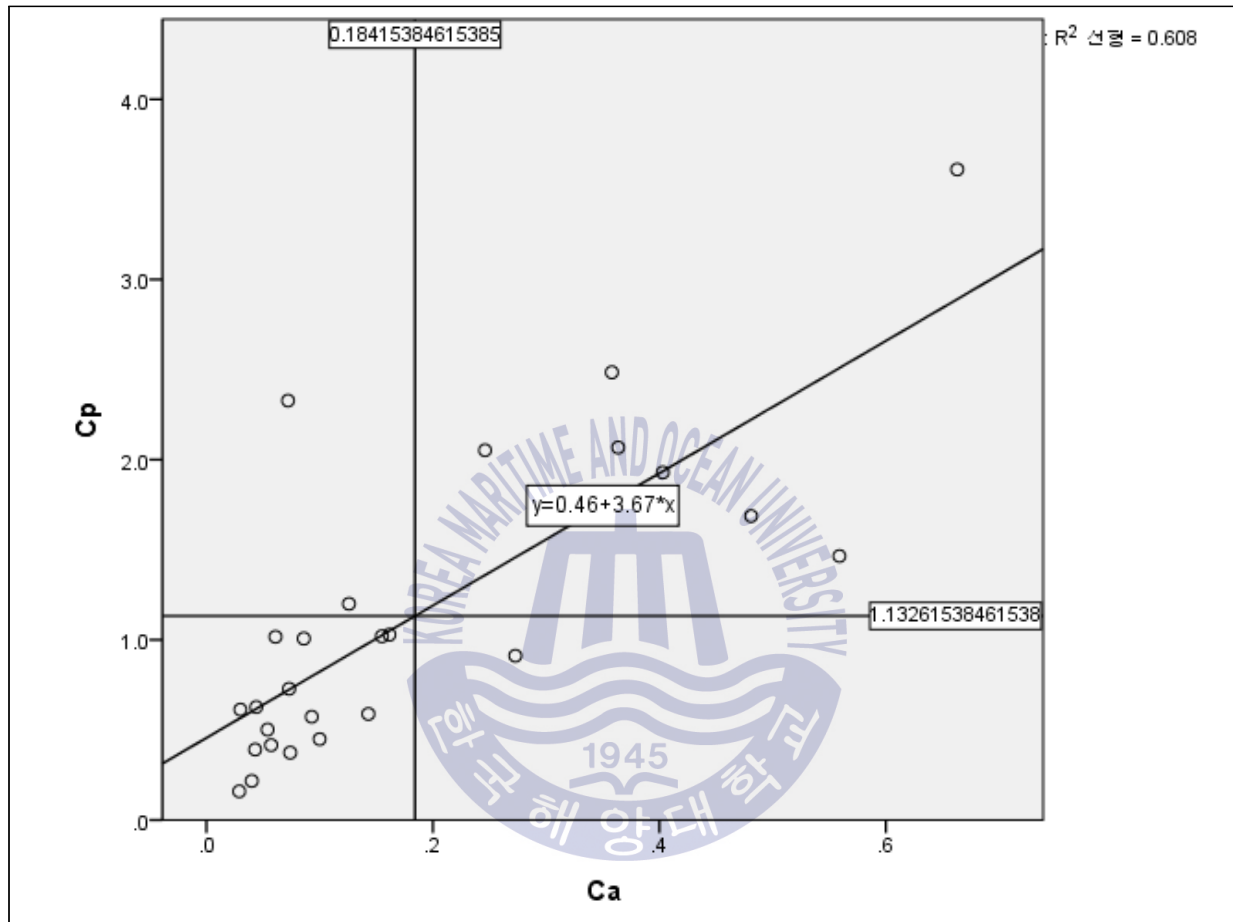


Fig. 82 Correlation of C_A and C_P

Table 29 Result of C_A and C_P by port

항 만	C_A	C_P	배 율(C_P / C_A)
인 천	7.5%	44.1%	5.9
울 산	18.9%	110.8%	5.9
평택 · 당진	8.7%	58.9%	6.8
부 산	28.9%	218.7%	7.6
부산항신항	46.6%	187.9%	4.0
대 산	4.7%	60.2%	12.8

4.3.2 해상교통혼잡도에 영향을 주는 변수 검토

이러한 결과를 토대로 해상교통혼잡도에 의한 혼잡도에 영향을 주는 변수의 민감도를 검토하기 다중회귀분석을 수행하였다.

다중회귀분석 결과는 Table 30과 같으며, 유의확률의 경우, 일평균교통량(P_{av}), 통항선속(S_{av}), 항로폭(W_{min}) 순으로 유의도가 높은 것으로 분석되었다.

표준화계수 베타 값의 경우, 베타 값이 1에 가까울수록 높은 영향력을 주고, 0에 가까울수록 낮은 영향을 준다. 또한 양수면 긍정적인 영향 음수면 부정적인 영향을 준다. 표준화계수 베타 값 비교 결과, 일평균교통량(P_{av}), 통항선속(S_{av}), 항로폭(W_{min})(음수) 순으로 종속변수에 미치는 영향력이 큰 것으로 분석되었다.

독립변수 간 다중공선성 검토에서는 모든 변수의 공차한계가 0.1보다 큰 것으로 분석되어 독립변수간 과도한 상관으로 인한 추정오류는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.

Table 30 Independent Variables Affecting Dependent Variables

모 형		비표준화 계수		표준화 계수	t	유의확률	공선성 통계량	
		B	표준오차	베타			공차	VIF
C_A	(상수)	.097	.167		.585	.8565		
	W_{min}	-1.705E-5	.000	-.030	-.184	.856	.835	1.198
	P_{av}	.002	.000	.690	4.311	.000***	.873	1.145
	S_{av}	-.008	.015	.079	-.513	.613	.948	1.055
$p^* < 0.1$, $p^{**} < 0.05$, $p^{***} < 0.01$								

또한 각 변수와 평균 해상교통혼잡도(C_A)의 산포도를 작성하여, 경향을 파악하고자 하였다. 분석결과, 일평균교통량(P_{av})이 많으면 혼잡도가 커지는 경향을 볼 수 있으며, 항로폭(W_{min})의 경우, 항로폭이 넓을수록 혼잡도가 작아지는 경향

을 볼 수 있었다.

통항선속(S_{av})의 경우, 국내 주요 항만 및 항로에서 주로 통항하는 선속인 약 10~11 knots 사이에서 혼잡도가 가장 높은 것으로 분석되었다. 이는 항만의 규정 또는 여건 등으로 해당 선속을 유지하고자 하는 운항자의 의도 즉, 기타 변수(항만의 환경 및 운항 습관 등)로 작용할 수 있는 요소가 반영되어 있는 것으로 판단되며, 동일한 항로폭 및 여건에서 선속에 따른 혼잡도를 비교할 경우, 선속이 높을수록 혼잡도가 낮아지는 것으로 검토되었다.

해상교통혼잡도의 변수 민감도를 검토한 결과, IWRAP Mk2의 변수 민감도 검토 결과와 유사하게 P_{av} , W_{min} , S_{av} 에 따라 결과 값에 영향을 주는 것을 알 수 있었으며, 변수에 미치는 유의도 및 영향력의 차이는 존재하는 것으로 분석되었다.

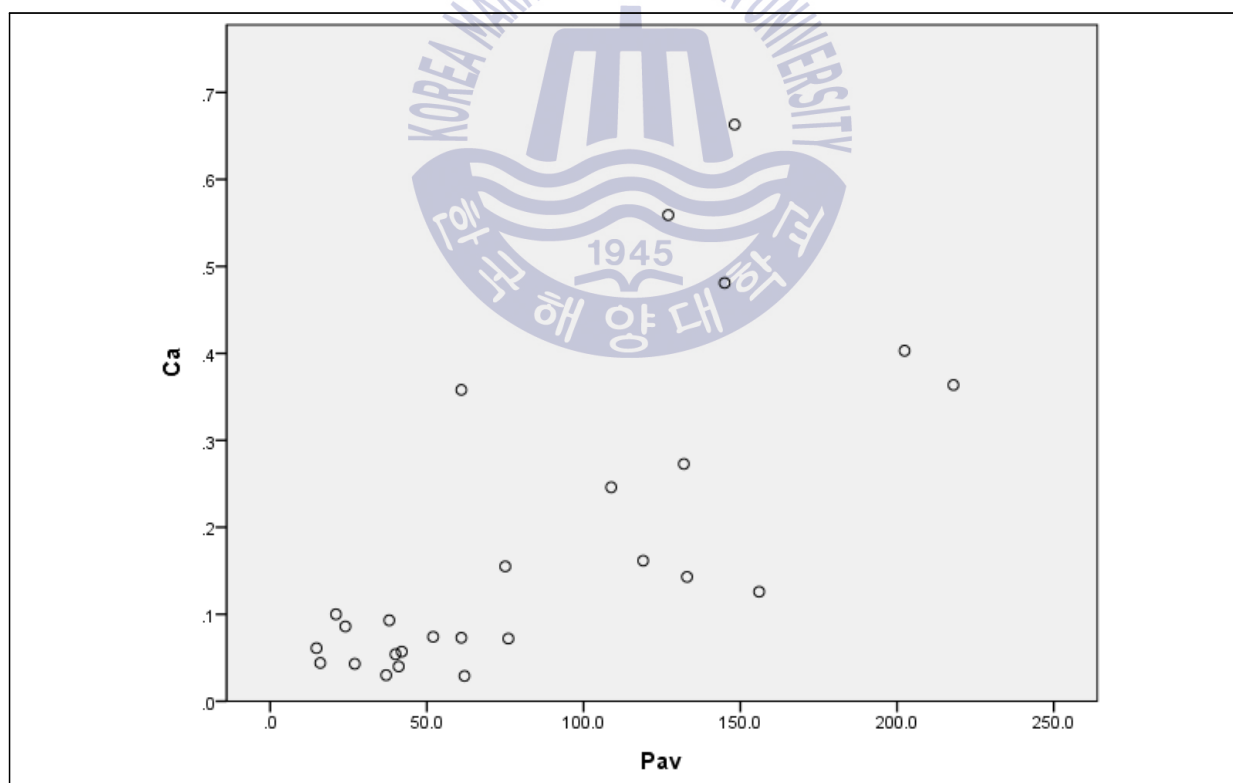


Fig. 83 Dairy average traffic volume – Marine traffic congestion

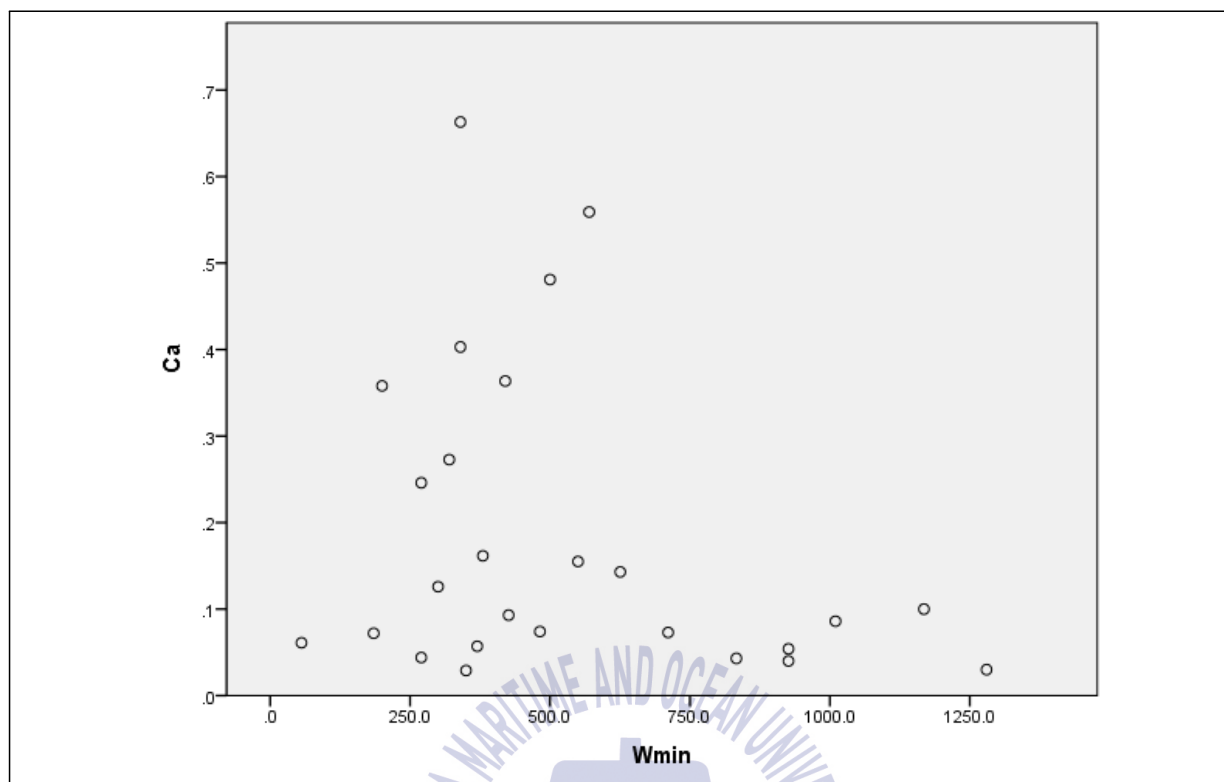


Fig. 84 Port waterway width – Marine traffic congestion

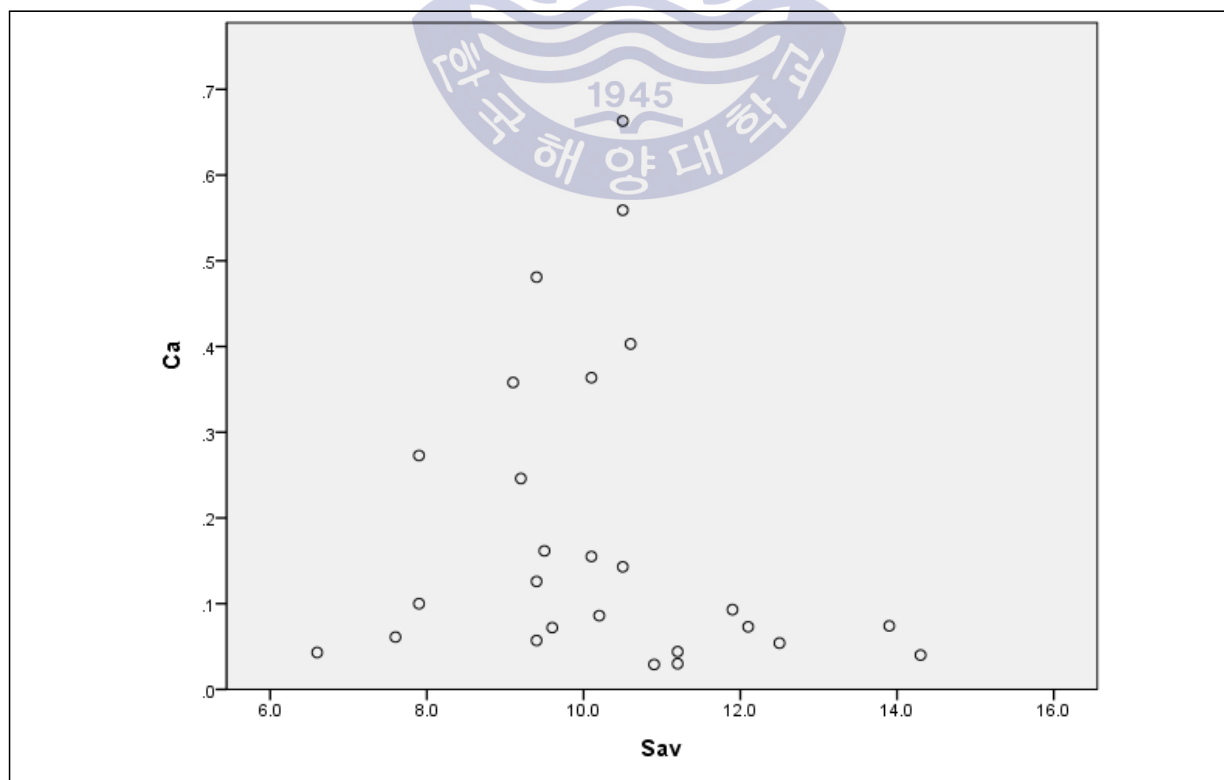


Fig. 85 Passing speed – Marine traffic congestion

제 5 장 항로 위험도 및 혼잡도와의 연관성 분석

5.1 IWRAP Mk2 및 해상교통혼잡도 평가 결과

본 장에서는 제3장 및 제4장에서 분석한 IWRAP Mk2 기반 항로 위험도 평가 및 해상교통혼잡도 기반 항로 혼잡도를 이용하여 이 두 평가모델의 상호 연관성을 검토하고, 이에 따른 새로운 모델의 방향에 대하여 제시하고자 한다. 국내 주요 항만 및 항로의 충돌확률 및 해상교통혼잡도는 Table 31 및 Fig 86과 같다.

Table 31 Collision probability and Congestion of port waterway

구 분		IWRAP Mk2			Congestion	
		Head-on	Overtaking	λ_{Col}	C_A	C_P
인 천	동수도	0.00083	0.00076	0.00159	5.4%	50.2%
	서수도	0.00141	0.00079	0.00220	4.0%	21.7%
	3항로	0.00120	0.00020	0.00141	4.3%	39.1%
	1항로-입항	0.00622	0.00207	0.00829	9.3%	57.3%
	1항로-출항	0.00127	0.00147	0.00274	7.4%	37.4%
	인천대교	0.01247	0.00092	0.01339	14.3%	58.9%
울 산	제1항로	0.01561	0.00098	0.01660	27.3%	91.2%
	제2항로	0.01962	0.00124	0.02086	12.6%	120.0%
	제1,2항로	0.05593	0.00402	0.05995	36.4%	206.8%
	제3항로	0.00396	0.00044	0.00440	16.2%	102.9%
	제4항로	0.00151	0.00021	0.00171	5.7%	41.6%
	울산진입항로	0.00773	0.00084	0.00858	15.5%	102.0%
평택·당진	진입항로	0.00206	0.00022	0.00228	7.3%	44.9%
	서부두시점	0.00086	0.00053	0.00133	10.0%	72.8%

부 산	조도방파제	0.02872	0.01147	0.04019	66.3%	361.1%
	부산항대교	0.03182	0.00688	0.03870	40.3%	192.9%
	부산대교	0.01099	0.00012	0.01111	6.1%	101.7%
	남항대교	0.01157	0.00023	0.01180	7.2%	232.8%
	감천항방파제	0.02387	0.00085	0.02473	24.6%	205.2%
부산항 신항	동방파제	0.05407	0.00454	0.05861	55.9%	146.5%
	토도남측	0.00487	0.00067	0.00554	35.8%	248.5%
	토도북측	0.00741	0.00190	0.00931	48.1%	168.7%
대 산	대산항 항계선	0.00084	0.00002	0.00087	8.6%	100.7%
	제1항로	0.00125	0.00003	0.00127	3.0%	61.3%
	흑어도북측	0.00698	0.00000	0.00698	4.4%	62.7%
	비경도서측	0.01329	0.00018	0.01347	2.9%	15.9%

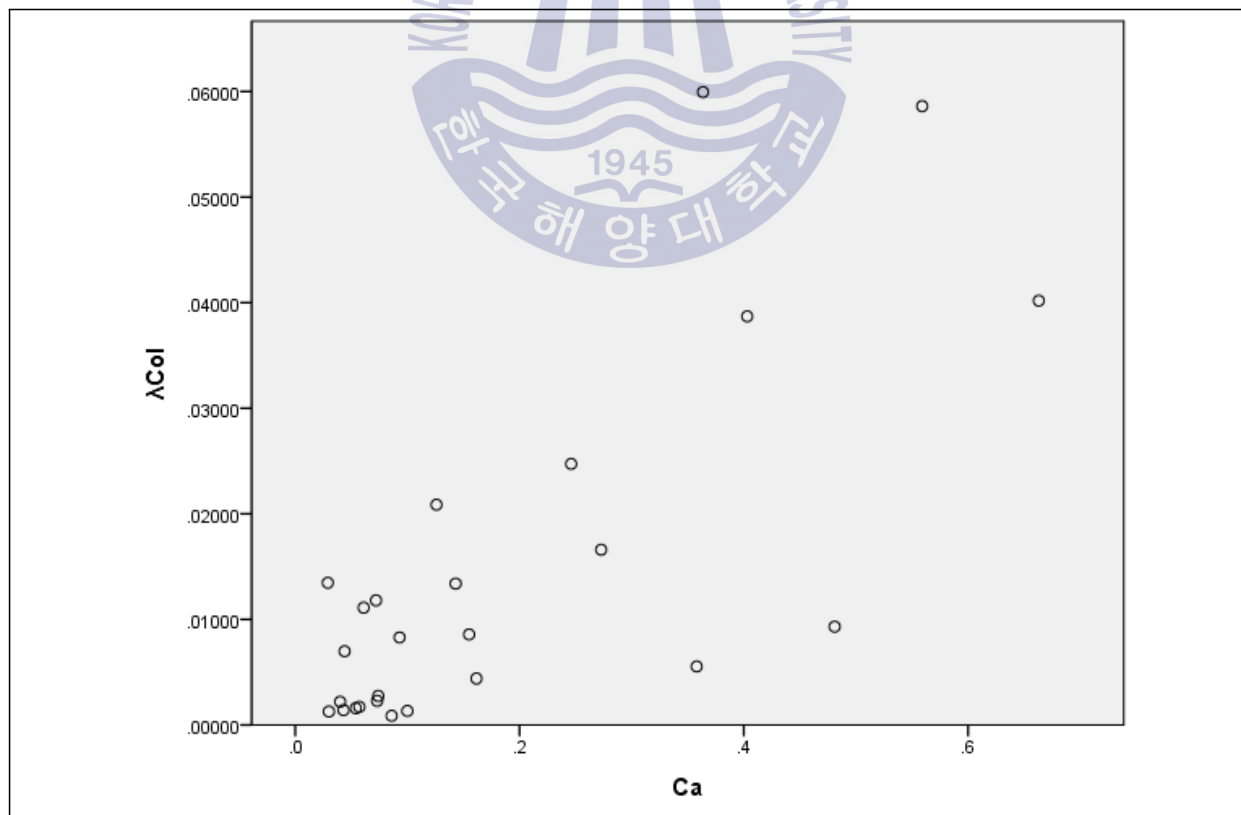


Fig. 86 Collision Probability - Marine traffic congestion

5.2 그룹 설정

3.3.2절 및 4.3.2절의 충돌확률 및 혼잡도에 영향을 주는 변수의 민감도 분석결과(다중회귀분석)에서 보듯이 일평균통항척수가 가장 유의도가 높은 것으로 분석되었으며, 항로폭과 통항선속의 경우, 변수에 미치는 영향력이 크지 않아 유효성이 상대적으로 부족하다.

그러나 해양사고는 항로를 이용하는 전체 통항척수 외에도 환경적인 요소(항로폭 등)와 인적과실(선박간의 통항선속 등)에 따른 인과관계가 성립하는 경우도 존재한다.[22] 이에 각 항만은 항로에서의 적정 속도 규정을 제시하고 있으며, 통항안전성 확보를 위한 항로폭 결정에 관한 연구도 활발하게 진행 중이다.[23],[24]

따라서 본 연구에서는 일평균 통항척수 외에 항로폭과 통항선속에 따른 요인도 고려하고자 하였으며, 연관성 분석 시 제3장 및 제4장의 분석 결과 및 변수 민감도 검토 결과를 토대로 각 변수가 서로에게 영향을 주지 않도록 최대한 묶어내기 위해 변수분리(Separation of variable)법을 사용하였다.

변수분리법이란 변수가 여러 개인 함수에 대한 편미분 방정식과 상미분 방정식의 한 쪽 변에 한 변수를 모아 옮긴 후, 각 변수에 대해 따로 방정식을 세워 쉽게 풀기 위한 방법이다.[25]

다만, 본 연구에서는 항로의 위험도와 혼잡도의 연관성만 보고자 하므로, 편미분 방정식과 상미분 방정식을 이용하여 직접 해를 구하지 않고, 변수별 그룹 설정 및 그룹별 평균값을 제시하여 연관성을 파악하고자 하였다. 그룹의 구분 및 특성은 Table 32와 같다.

Table 32 Set the group

구 분		특 성
P_{av} (일평균 통항척수)	Group A	• 50척 미만
	Group B	• 50~120척 미만
	Group C	• 120척 이상
W_{min} (항로폭)	Group A	• 350m 미만
	Group B	• 350~600m 미만
	Group C	• 600m 이상
S_{av} (통항선속)	Group A	• 9.5 knots 미만
	Group B	• 9.5~11.0 knots 미만
	Group C	• 11.0 knots 이상



5.2.1 일평균 통행척수 그룹 상세

일평균 통행척수(P_{av}) 그룹별 상세는 Table 33과 같다.

Table 33 Set the group for Dairy average traffic volume

구 분			P_{av} (일평균 통행척수) (척)
Group A	부 산	부산대교	15
	대 산	흑어도북측	16
	평택·당진	서부두 시점	21
	대 산	대산항 항계선	24
	인 천	3항로	27
	대 산	제1항로	37
	인 천	1항로-입항	38
	인 천	동수도	40
	인 천	서수도	41
	울 산	제4항로	42
Group B	인 천	1항로-출항	52
	부산항신항	토도남측	61
	평택·당진	진입항로	61
	대 산	비경도서측	62
	울 산	제1,2,3,4,5	75
	부 산	남항대교	76
	부 산	감천항방파제	109
	울 산	제3항로	119
Group C	부산항신항	동방파제	127
	울 산	제1항로	132
	인 천	인천대교	133
	부산항신항	토도북측	145
	부 산	조도방파제	148
	울 산	제2항로	156
	부 산	부산항대교	202
	울 산	제1,2항로	218

5.2.2 항로폭 그룹 상세

항로폭(W_{\min}) 그룹별 상세는 Table 34와 같다.

Table 34 Set the group for Port waterway width

구 분			W_{\min} (항로폭) (m)
Group A	부 산	부산대교	56.0
	부 산	남항대교	185.0
	부산항신항	토도남측	200.0
	부 산	감천항방파제	270.0
	대 산	흑어도북측	270.0
	울 산	제2항로	300.0
	울 산	제1항로	320.0
	부 산	조도방파제	340.0
	부 산	부산항대교	340.0
Group B	대 산	비경도서측	350.0
	울 산	제4항로	370.0
	울 산	제3항로	380.0
	울 산	제1,2항로	420.0
	인 천	1항로-입항	426.0
	인 천	1항로-출항	482.0
	부산항신항	토도북측	500.0
	울 산	제1,2,3,4,5	550.0
	부산항신항	동방파제	570.0
Group C	인 천	인천대교	625.5
	평택·당진	서부두 시점	711.0
	인 천	3항로	833.0
	인 천	동수도	926.0
	인 천	서수도	926.0
	대 산	대산항 항계선	1,010.0
	평택·당진	진입항로	1,168.0
	대 산	제1항로	1,280.0

5.2.3 통항선속 그룹 상세

통항선속(S_{av}) 그룹별 상세는 Table 35와 같다.

Table 35 Set the group for Passing speed

구 분			S_{av} (통항선속) (knots)
Group A	인 천	3항로	6.6
	부 산	부산대교	7.6
	울 산	제1항로	7.9
	평택·당진	서부두 시점	7.9
	부산항신항	토도남측	9.1
	부 산	감천항방파제	9.2
	울 산	제2항로	9.4
	울 산	제4항로	9.4
	부산항신항	토도북측	9.4
	울 산	제3항로	9.5
Group B	부 산	남항대교	9.6
	울 산	제1,2항로	10.1
	울 산	제1,2,3,4,5	10.1
	대 산	대산항 항계선	10.2
	인 천	인천대교	10.5
	부 산	조도방파제	10.5
	부산항신항	동방파제	10.5
	부 산	부산항대교	10.6
	대 산	비경도 서측	10.9
Group C	대 산	제1항로	11.2
	대 산	흑어도 북측	11.2
	인 천	1항로-입항	11.9
	평택·당진	진입항로	12.1
	인 천	동수도	12.5
	인 천	1항로-출항	13.9
	인 천	서수도	14.3

5.3 분석결과

5.3.1 일평균 통행척수 그룹 분석결과

일평균 통행척수 그룹에서의 각 그룹별 위험도(충돌확률) 및 해상교통혼잡도 연관성 분석 결과, 각 그룹별 충돌확률과 혼잡도와의 연관성은 뚜렷하게 나타나지 않고 있으나, 각 그룹별 평균값을 비교할 경우, 일평균 통행량이 많은 그룹일수록 충돌확률 및 혼잡도가 높아지는 경향을 볼 수 있다.

각 그룹별 혼잡도(C_A) 및 충돌확률(λ_{Col})의 평균값(Mean)은 식(8)과 같이 산출되며 식(8)에 의한 그룹별 평균값(Mean)은 Table 36과 같다.

$$MeanP_{av(Group\ x)} = \frac{\sum_{n=1}^j (C_a, \lambda_{col})n}{j} \quad (8)$$

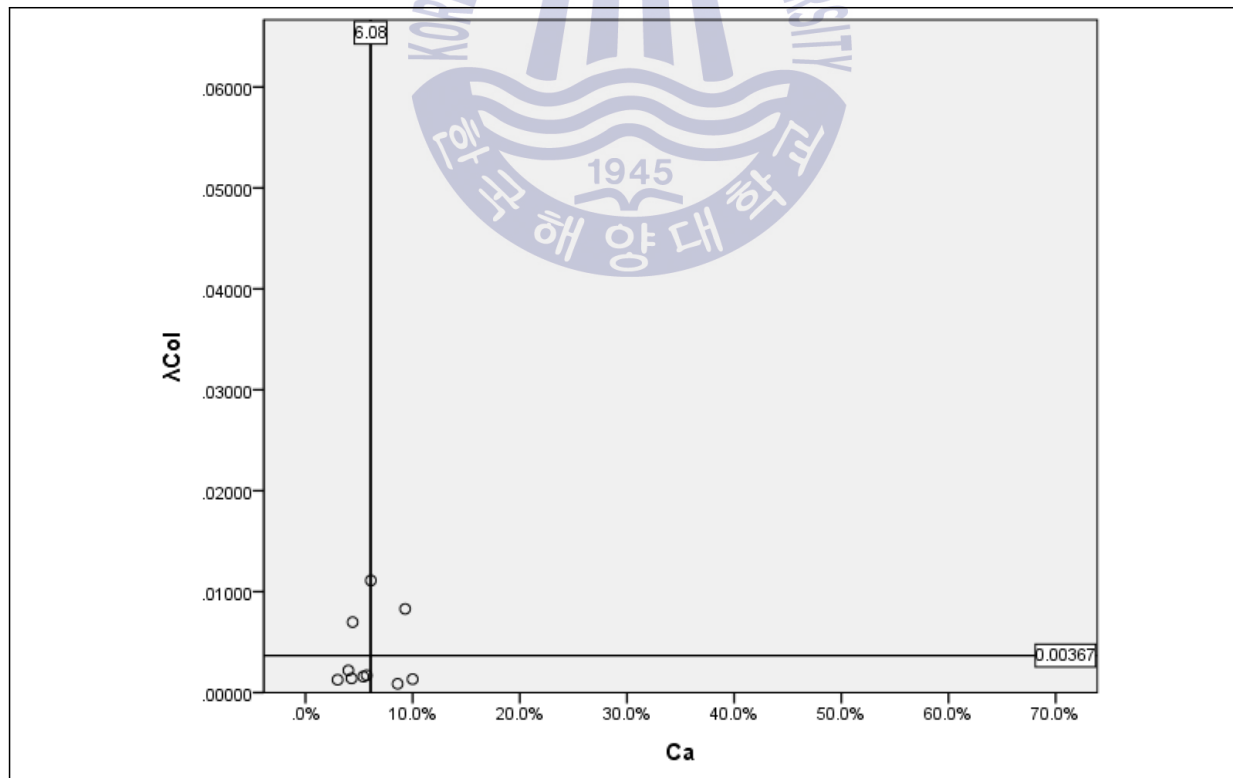


Fig. 87 Correlation for Collision Probability and Congestion- Group A

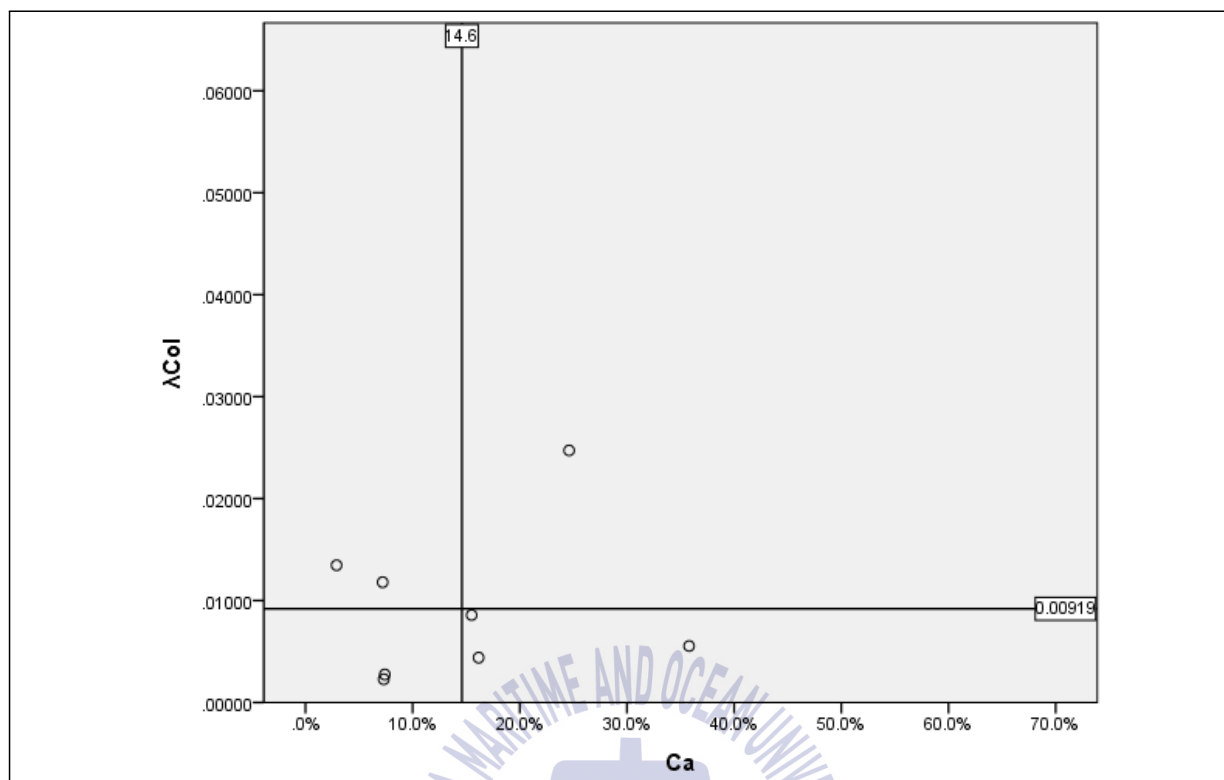


Fig. 88 Correlation for Collision Probability and Congestion- Group B

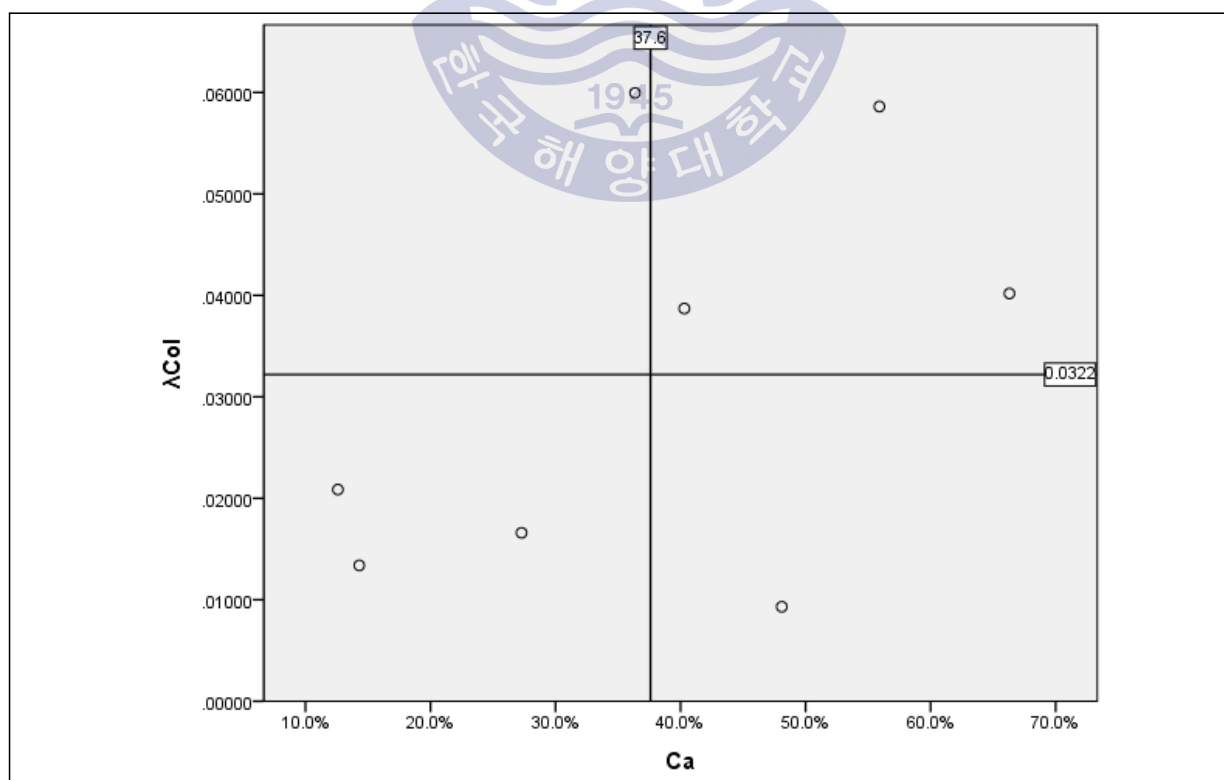


Fig. 89 Correlation for Collision Probability and Congestion- Group C

Table 36 Mean per Group(P_{av})

구 분		Mean	
		C_A	λ_{Col}
P_{av} (일평균 통행척수)	Group A	6.1%	0.00368
	Group B	14.6%	0.00919
	Group C	37.6%	0.03220

5.3.2 항로폭 그룹 분석결과

항로폭 그룹에서의 각 그룹별 위험도(충돌확률) 및 해상교통혼잡도 연관성 분석 결과, 각 그룹별 충돌확률과 혼잡도와의 연관성은 뚜렷하게 나타나지 않고 있으나, 그룹 A(350m 미만)의 경우, 일부 항로를 제외하고 충돌확률과 혼잡도가 직선함수에 가까운 것으로 보인다.

또한 그룹 C(600m 이상)에서는 혼잡도 대비 충돌확률이 그리 높지 않은 것으로 분석되었다. 각 그룹별 평균값을 비교할 경우, 항로폭이 넓은 그룹일수록 충돌확률 및 해상교통혼잡도가 낮아지는 경향을 볼 수 있다.

각 그룹별 혼잡도(C_A) 및 충돌확률(λ_{Col})의 평균값(Mean)은 식(9)와 같이 산출되며 식(9)에 의한 그룹별 평균값(Mean)은 Table 37과 같다.

$$MeanW_{min(Group\ x)} = \frac{\sum_{n=1}^j (C_a, \lambda_{col})n}{j} \quad (9)$$

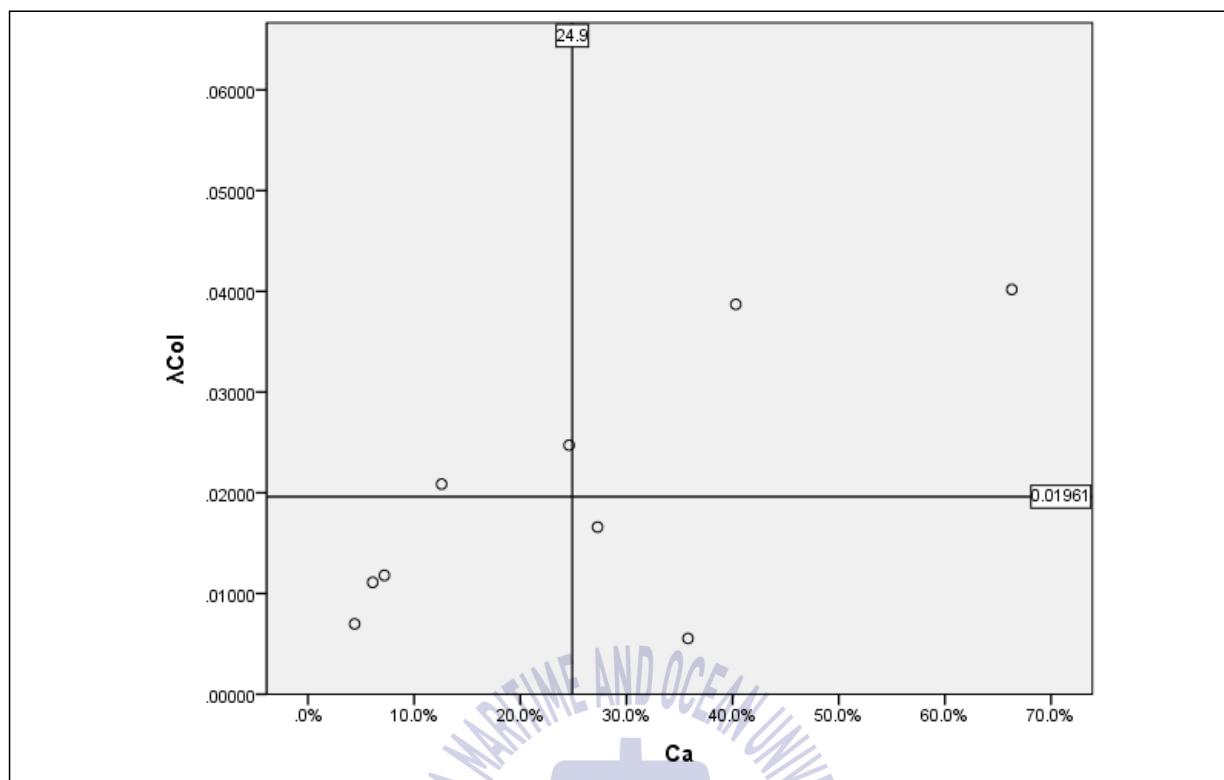


Fig. 90 Correlation for Collision Probability and Congestion – Group A

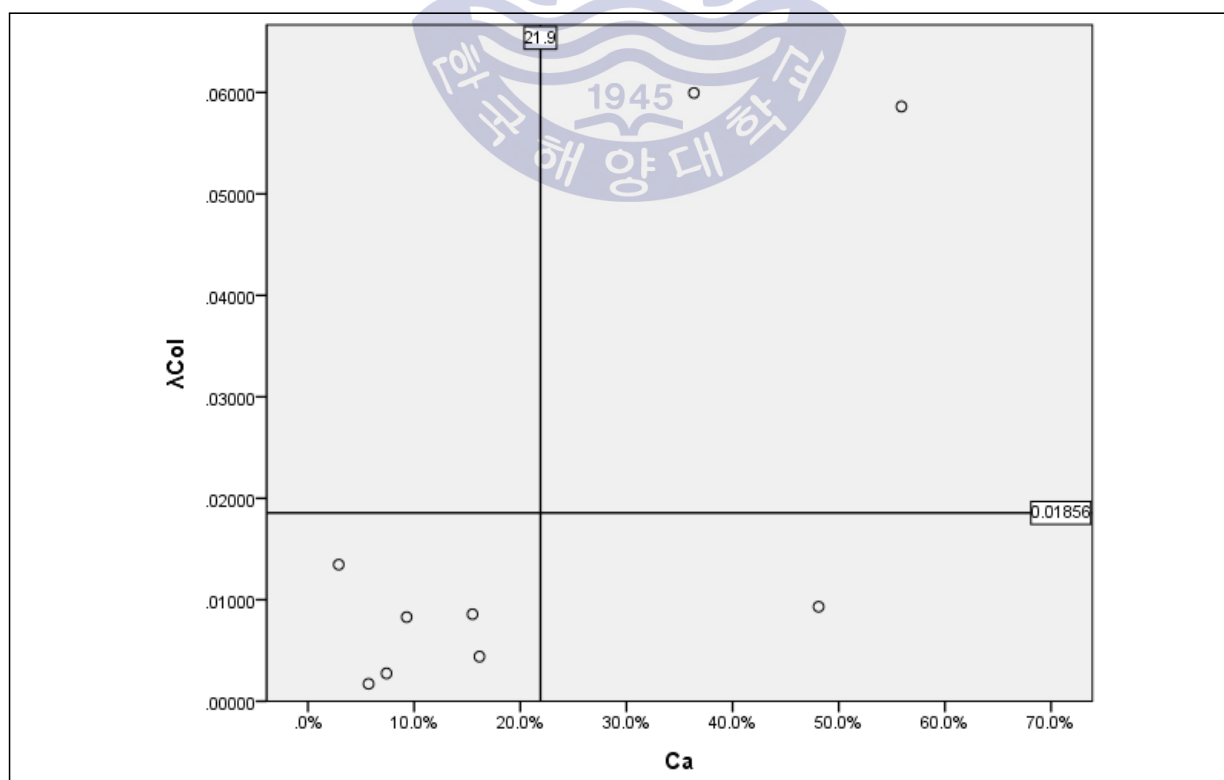


Fig. 91 Correlation for Collision Probability and Congestion – Group B

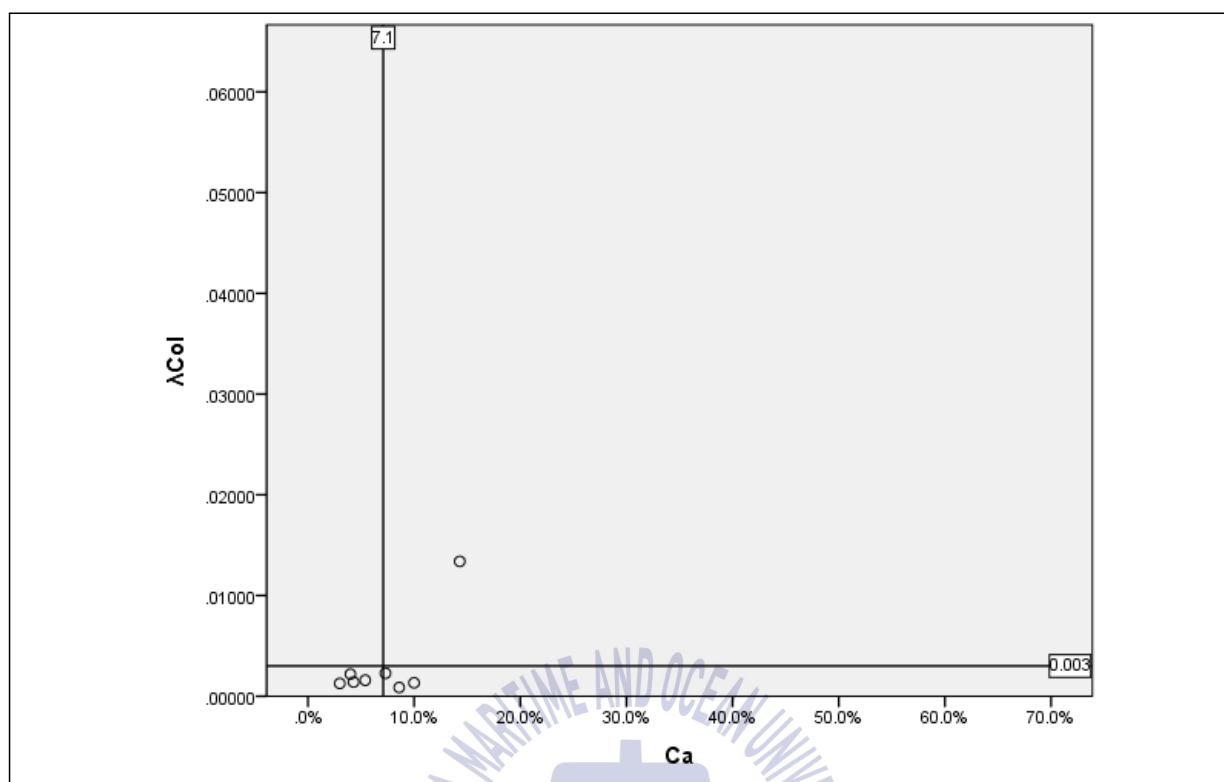


Fig. 92 Correlation for Collision Probability and Congestion – Group C

Table 37 Mean per Group(W_{\min})

구 분		Mean	
		C_A	λ_{Col}
W_{\min} (항로폭)	Group A	19.1%	0.00970
	Group B	27.5%	0.02728
	Group C	5.8%	0.00362

5.3.3 통항선속 그룹 분석결과

통항선속 그룹에서의 각 그룹별 위험도(충돌확률) 및 해상교통혼잡도 연관성 분석 결과, 그룹 A(9.5 knots 미만)와 그룹 C(11.0 knots 이상)에서는 뚜렷한 연관성은 나타나지 않지만, 그룹 B(9.5~11.0 knots 미만)에서는 충돌확률 및 혼잡도가 비교적 양분화 되는 경향이 보인다.

각 그룹별 평균값을 비교할 경우, 일정 선속 이하 및 이상의 그룹에서 충돌확률 및 혼잡도가 크게 낮아지는 경향을 볼 수 있다.

각 그룹별 혼잡도(C_A) 및 충돌확률(λ_{Col})의 평균값(Mean)은 식(10)과 같이 산출되며 식(10)에 의한 그룹별 평균값(Mean)은 Table 38과 같다.

$$MeanS_{av(Group\ x)} = \frac{\sum_{n=1}^j (C_a, \lambda_{col})n}{j} \quad (10)$$

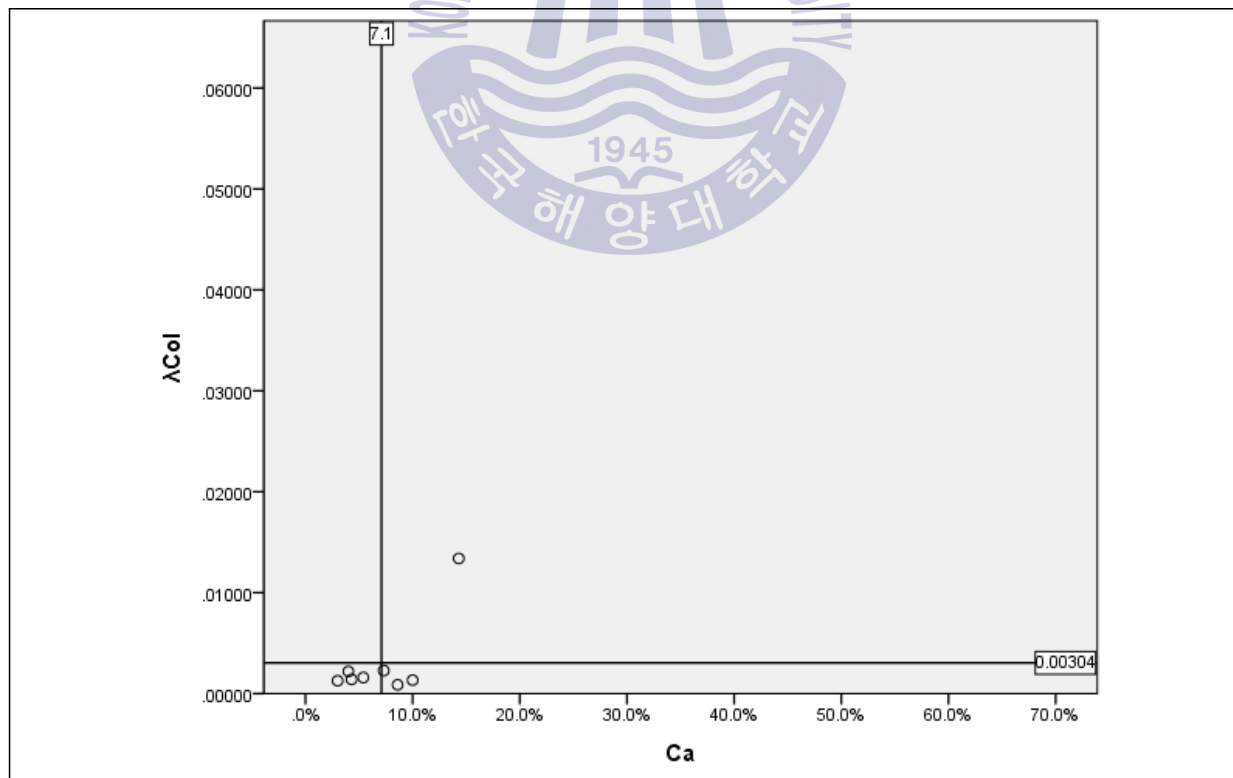


Fig. 93 Correlation for Collision Probability and Congestion - Group A

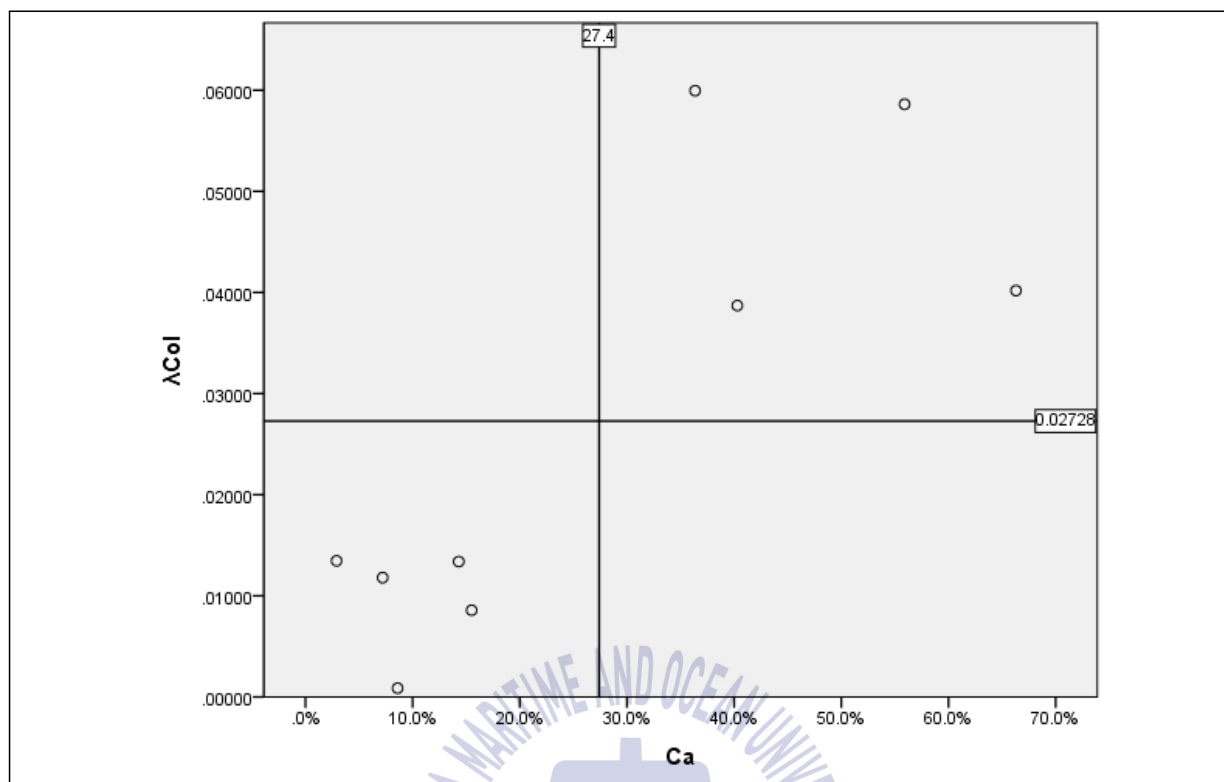


Fig. 94 Correlation for Collision Probability and Congestion – Group B

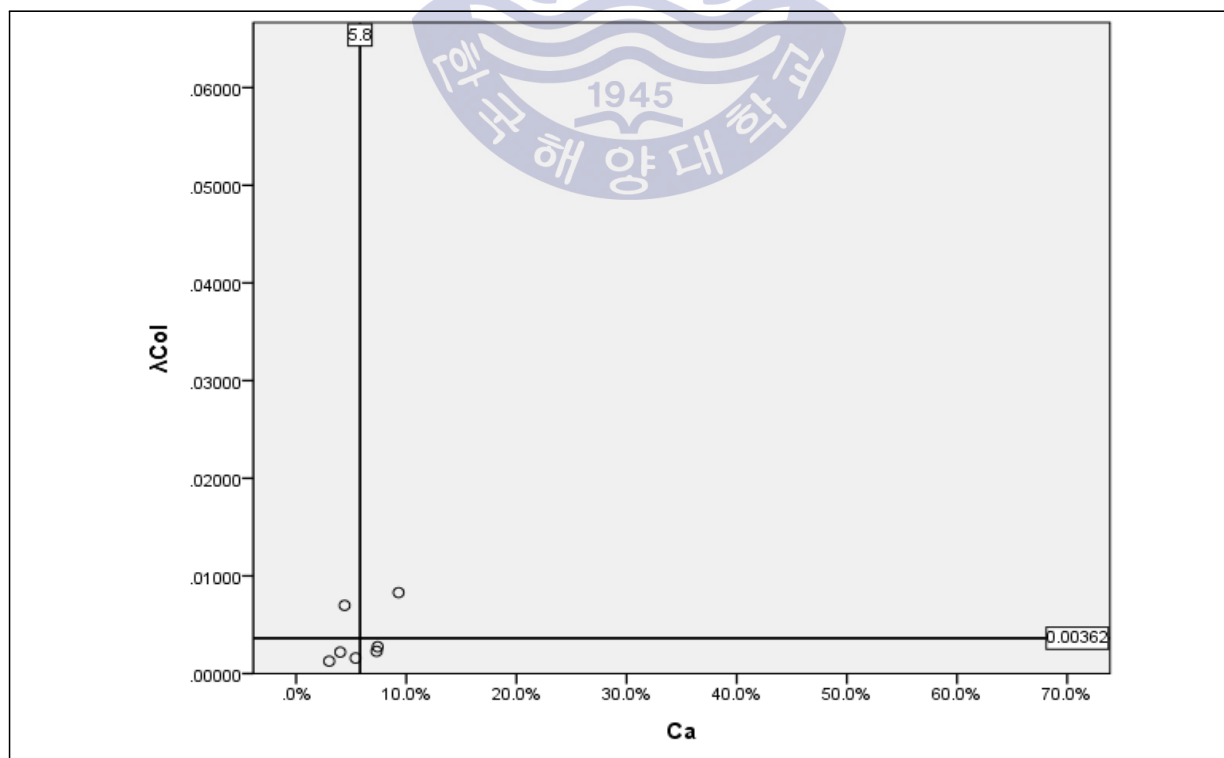


Fig. 95 Correlation for Collision Probability and Congestion – Group C

Table 38 Mean per Group(S_{av})

구 분		Mean	
		C_A	λ_{Col}
S_{av} (통항선속)	Group A	7.1%	0.00304
	Group B	27.4%	0.02728
	Group C	5.8%	0.00362

5.3.4 그룹별 평균값(Mean) 연관성 분석결과

각 그룹별 평균값(Mean)을 이용하여 항로 위험도와 혼잡도의 연관성을 알아보 고자 회귀분석을 수행하였으며, Table 39 및 Fig. 96과 같이 R^2 이 0.943인 높은 설명력을 가진 선형함수가 도출되었다. 유의확률(P-Value)의 경우, 유의수준($p < 0.01$)보다 작게 나타나 유의성이 있는 것으로 분석되었으며, 이는 위험도(충돌확률)와 혼잡도와의 연관성이 상당히 큰 것으로 판단할 수 있다.

또한 충돌확률과 혼잡도의 각 변인 간에 상관관계를 알아보하고자 Pearson 이변량 상관분석을 실시하였으며, 분석 결과, Table 40과 같이 Pearson 상관계수가 0.943으로 높게 나타나 강한 정적 상관관계를 보였다.

항로 위험도와 혼잡도의 연관성 분석을 통하여 식(11)을 도출할 수 있었으며, 식(11)을 이용하여 혼잡도 대비 충돌확률의 예측이 가능하고, 유사한 환경을 가진 타 항로와의 위험도 비교가 가능할 것으로 판단된다.

$$\lambda_{Col} = -0.30034 + 0.0959 \cdot C_A \quad (11)$$

다만 해당 모델의 경우, 특정 시간대(교통량이 가장 많은 연속된 5일)를 분석한 결과로, 정확한 연간 값을 대변하기 어려우며, 모든 국내 항로를 분석하지 않았기 때문에 신뢰도가 다소 낮을 수 있다는 한계가 존재한다. 또한 항만 및 항로가 가지고 있는 다양한 환경적인 특성(예: 선속규정, 입출항시간, 공사중 상황 등) 또한 고려하지 못한다는 부분도 존재한다.

Table 39 Independent Variables Affecting Dependent Variables

모형	구분	비표준화 계수		표준화 계수	t	p	F	R^2 (adj. R^2)
		B	표준오차	β				
C_A	(상수)	-.003	.002		-1.843	.108	115.983	.971
	C_A	.001	.000	.971	10.770	.000		(.943)
	종속변수: λ_{Col}							

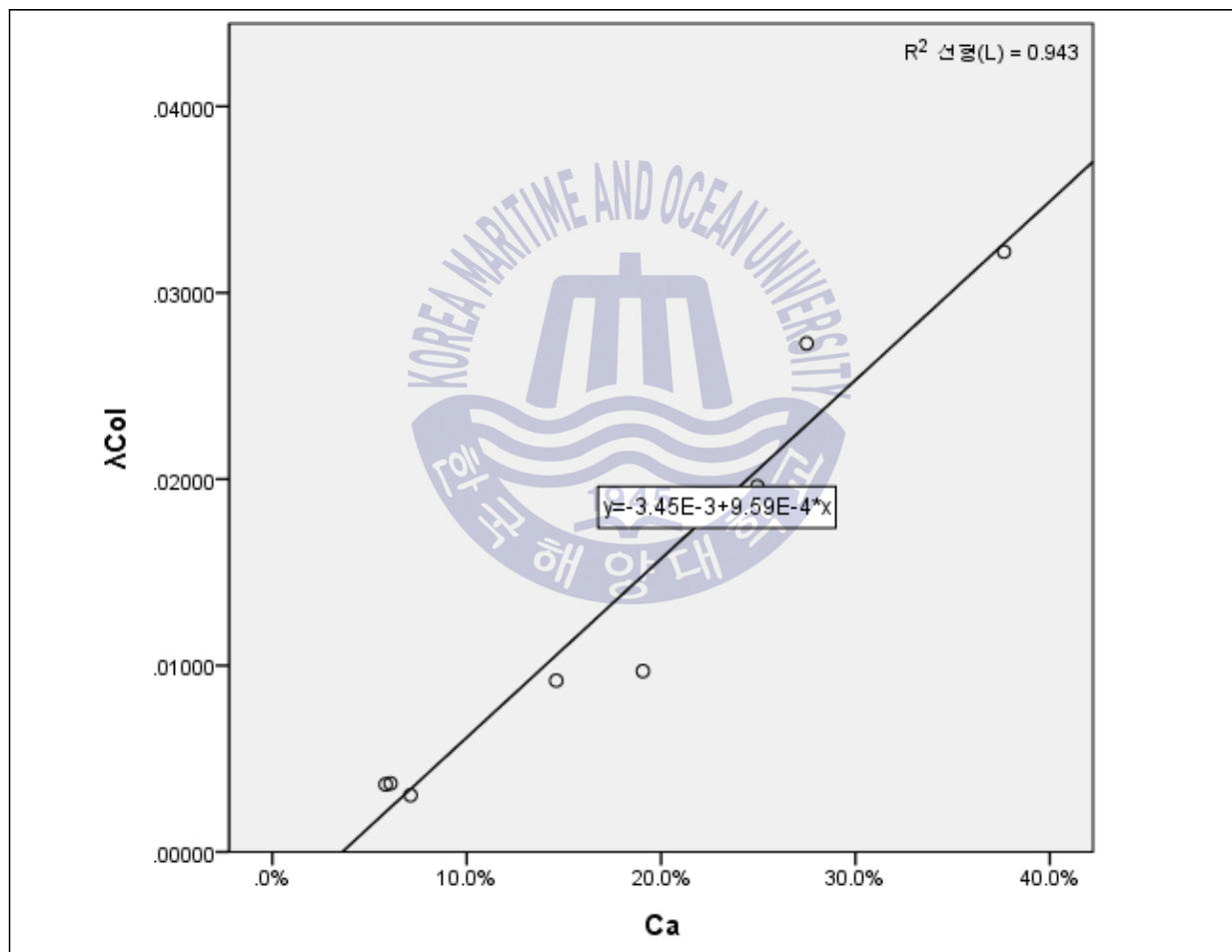


Fig. 96 Regression analysis of Collision Probability and Congestion

Table 40 Correlation(Pearson) between C_A and λ_{Col}

		C_A	λ_{Col}
λ_{Col}	Pearson 상관	1	.971
	유의확률		.000
	N	.	9
C_A	Pearson 상관	.971***	1
	유의확률	.000	
	N	9	9
p* < 0.1, p** < 0.05, p*** < 0.01			

5.4 종합결과

항로의 위험도 및 혼잡도와와의 연관성을 분석하기 위하여 IWRAP Mk2 기반 항로 위험도 및 해상교통혼잡도 기반 항로 혼잡도 평가 결과를 이용하였다.

분석 방법으로는 각 변수가 서로에게 영향을 주지 않도록 최대한 묶어내기 위해 변수분리(Separation of variable)법을 사용하였으며, 변수별 그룹을 설정하고, 그룹별 평균값을 제시하여 연관성을 파악하고자 하였다.

IWRAP Mk2 및 해상교통혼잡도 두 모델은 공통적으로 입력되는 변수가 분명히 존재하지만, 변수의 처리과정 또는 계산방법의 차이 등으로 인하여 각기 다른 결과 값이 도출된다.

IWRAP Mk2는 위험도를 사고가 발생할 확률로 평가하고 있으며, AIS Data을 기반으로 환경 및 공간적인 측면을 다양하게 고려할 수 있다. 그러나 초기 설정이 다소 복잡하며, 입력 요소가 다양하여 많은 Data를 필요로 한다. 또한 프로그램을 직접 구매하여 사용해야 하는 등 접근하기 다소 어려운 점이 존재한다.

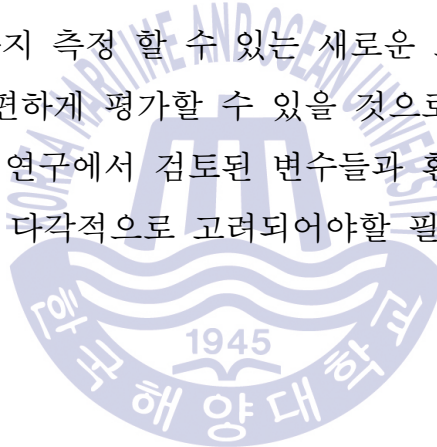
해상교통혼잡도의 경우, 항로의 위험도를 Density적인 측면에서 평가하고 있으며, 대부분의 data를 표준화 또는 평균치로 계산하기 때문에 비교적 계산이 간단하여 쉽게 이용이 가능하지만, 해상교통혼잡도가 가지는 수치가 대부분의 사람들

에게 체감되기 힘든 면이 존재한다.

5.3절의 연관성 분석결과와 같이 항로의 위험도(충돌확률)와 혼잡도는 강한 연관성을 가지고 있는 것으로 분석되었으며, 이를 이용하여 혼잡도로 위험도(충돌확률)를 예측할 수 있는 선형회귀식을 이끌어 낼 수 있었다.

따라서 본 연구 결과를 활용한다면, 우리는 현재 국내에서 적용하고 있는 해상교통혼잡도(Marine Traffic Congestion)를 이용하여 항로의 위험도(Collision Probability)를 예측할 수 있으며, 항로의 위험도(Collision Probability) 제시를 통하여 항로의 위험도를 정량적으로 평가하기 위한 보조지표로 활용 할 수 있을 것으로 판단된다.

IWRAP Mk2를 이용하지 않고도 혼잡도와 같이 간단한 모델을 기반으로 실시간 Data를 이용하여 위험도까지 측정 할 수 있는 새로운 모델이 개발된다면 보다 다양한 항로의 위험도를 간편하게 평가할 수 있을 것으로 판단되며, 이러한 새로운 모델식 수립을 위해서 본 연구에서 검토된 변수들과 환경적인 요소 및 선박길이, 톤수, 선종 등의 변수들이 다각적으로 고려되어야할 필요성이 있다.



제 6 장 결 론

항로의 위험성을 평가하기 위해서는 다양한 방법들이 존재하며, 여러 국가별로 적절한 평가모델을 채택하여 사용하고 있다.

국내에서는 해상교통혼잡도라는 모델을 이용하여 항로의 위험도를 Density 측면에서 평가하고 있으며, 해상교통혼잡도 수치가 높으면 충돌과 같은 위험상황이 발생할 개연성이 높다고 해석하고 있다.

그러나 ‘해상교통혼잡도 평가’의 경우, 그 결과 값이 운항자의 입장에서 위험도를 판단하기 어렵고, 실제 해상교통혼잡도가 상당히 높음에도 불구하고 사고 발생률이 낮거나 선박 운항자들이 큰 부담을 느끼지 않는 해역도 존재하기 때문에 단순히 위험도를 Density로만 평가하기엔 여러 가지 한계가 존재한다.

본 연구는 해상교통혼잡도 평가 이외에 항로의 위험도를 Collision Probability 측면에서 평가할 수 있는 IWRAP Mk2 모델을 이용하여 국내 주요 26개 항로의 위험도를 평가하고 두 모델의 연관성을 검토하였으며, 항로 혼잡도를 이용한 위험도 산출 방안을 제시하여 새로운 평가 모델의 필요성을 알리고자 하였다.

본 논문을 통하여 수행한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 해상교통안전성 평가모델을 조사하고 각 특징을 파악하였다. 현존하는 국내외 해상교통안전성 평가모델은 크게 정량적 평가모델(예-IWRAP Mk2, 해상교통혼잡도, Gas Model), 정성적 평가모델(예-PAWSA), 정량적·정성적 평가모델(예-FSA, PARK, NURI 등)로 구분할 수 있으며, 본 연구에서는 정량적인 평가모델 중 IWRAP Mk2와 해상교통혼잡도를 이용하였다.

IWRAP Mk2는 항로 위험도를 Collision Probability 측면에서 평가하고 있으며, AIS Data을 기반으로 환경 및 공간적인 측면을 다양하게 고려할 수 있다. 해상교통혼잡도의 경우, 항로 위험도를 Density 측면에서 평가하고 있으며, 평가대부분

의 data를 표준화 또는 평균치로 계산하기 때문에 비교적 계산이 간단하여 쉽게 이용이 가능하다는 특징이 있다.

둘째, IWRAP Mk2를 이용하여 위험도(충돌확률)를 평가하였다. 평가 대상 항로의 경우, 해도 및 실제교통량을 참고하여 대상 항만에 진입하기 위한 항로중 가장 통항량이 많고 항로폭이 협소한 곳을 우선적으로 설정하였으며, 인천항 6개 항로, 울산항 6개 항로, 평택·당진항 2개 항로, 부산항 5개 항로, 부산항신항 3개 항로, 대산항 4개 항로 등 총 26개의 항로를 분석하였다. 또한 가급적 실제 통항패턴을 반영하여 분석하고자 실무를 수행하며 수집하거나, 연구를 목적으로 요청한 해양수산부의 GICOMS Data(AIS) 및 각 항만을 관할하는 지방해양수산청의 Port-MIS(선박입출항신고)를 활용하였다.

평가결과, 26개 항로의 충돌확률 평균은 약 0.01415로 분석되었으며, 이중 Head-on 상황에서의 충돌확률 평균은 약 0.01255, Overtaking 상황에서의 충돌확률 평균은 약 0.0016으로 검토되었다. 평균값 대비 울산항 제1,2항로(0.05995)와 부산항신항 동방파제(0.05861)의 충돌확률이 가장 높은 것으로 분석되었다. 또한 충돌확률에 영향을 주는 변수의 민감도 검토를 위한 유의확률 분석결과, 일평균교통량(P_{av}), 항로폭(W_{min}), 통항선속(S_{av}) 순으로 유의도가 높은 것으로 분석되었으며, 표준화계수 베타 값 비교 결과, 일평균교통량(P_{av}), 항로폭(W_{min})(음수), 통항선속(S_{av}) 순으로 종속변수에 미치는 영향력이 큰 것으로 분석되었다.

셋째, 해상교통혼잡도를 이용하여 혼잡도를 평가하였다. 평가 대상 항로는 IWRAP Mk2에서 설정한 항로(총 26개)와 같으며, 항로폭 또한 IWRAP Mk2에서 설정한 항로폭과 동일하게 설정하였다.

평가결과, 해상교통혼잡도(C_A) 및 최대 해상교통혼잡도(C_P) 분석 결과, 해상교통혼잡도(C_A) 평균은 약 18.4%, 최대 해상교통혼잡도(C_P) 평균은 약 113.3%로 검토되었다. 평균값 대비 부산항 조도방파제의 C_A 및 C_P 가 가장 높은 것으로 분석되었으며, 이는 부산항 조도방파제 항로는 혼잡한 상황이 자주 발생하고, 이로 인하여 사고발생 개연성이 타 항로보다 높다는 의미로 해상교통안전진단에서 해석하고 있다. 또한 혼잡도에 영향을 주는 변수의 민감도 검토를 위한 유의확률 분

석결과, 일평균교통량(P_{av}), 통항선속(S_{av}), 항로폭(W_{min}) 순으로 유의도가 높은 것으로 분석되었으며, 표준화계수 베타 값 비교 결과, 일평균교통량(P_{av}), 통항선속(S_{av}), 항로폭(W_{min}) 순으로 종속변수에 미치는 영향력이 큰 것으로 분석되었다.

넷째, 항로 위험도(충돌확률)와 혼잡도의 연관성을 분석하였다. 제3장 및 제4장의 분석 결과 및 변수 민감도 검토 결과를 토대로 각 변수가 서로에게 영향을 주지 않도록 최대한 묶어내기 위해 변수분리(Separation of variable)법을 사용하였으며, 변수분리된 그룹을 설정하여 특성을 파악하고, 그룹별 평균값을 이용하여 회귀분석 및 Pearson 이변량 상관분석을 하였다.

연관성 분석 결과, 항로의 위험도(충돌확률)와 혼잡도는 강한 연관성을 가지고 있는 것으로 분석되었으며, 이를 이용하여 혼잡도를 이용하여 위험도(충돌확률)를 예측할 수 있는 회귀식을 이끌어 낼 수 있었다. 또한 해당 회귀식을 이용한다면 항로의 혼잡도 뿐 아니라 위험도(Collision Probability)의 제시도 가능하기 때문에 항로의 위험도를 정량적으로 평가하기 위한 보조지표로 활용 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 항로 위험도 및 혼잡도의 연관성을 분석하기 위해 국내 주요 26개의 항로에 대하여 IWRAP Mk2 및 해상교통혼잡도를 이용하여 평가하고, 연관성 분석을 통해 혼잡도 대비 위험도를 예측할 수 있는 회귀식을 도출하였다. 또한 이를 통해 새로운 모델개발을 위한 기초연구를 수행했다는 점에 의미를 부여하고 싶다.

다만 자료의 신뢰성을 위해서는 다양한 항만 또는 항로의 Database를 이용하는 것이 필요하다. 또한 실제 해역에서 발생한 해양사고(충돌 등)를 토대로 본 연구 결과와의 비교 및 검증에 대한 연구는 추후 연구과제로 남는다.

향후 우리나라 항로에 적합한 새로운 평가모델 개발을 위해서는 해상교통혼잡도와 같이 간단한 모델을 기반으로 실제 AIS Data를 이용하여 실시간 위험까지 파악할 수 있는 Dynamic 적인 요소가 가미되어야 한다. 그리고 새로운 모델식 수립을 위한 변수는 본 연구에서 검토된 변수 외에 환경적인 요소 및 선박길이, 톤수, 선종 등의 변수들이 다각적으로 고려되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 장인식, 2009. 해양사고 방지를 위한 효율적 안전관리 방안. 해양안전학회지 제15권 제1호
- [2] 해양수산부, 2017. 해사안전법, 해사안전법 시행령, 해사안전법 시행규칙, 해상교통안전진단 시행지침
- [3] 김광일, 2012. *IWRAP에 의한 항만진입수로 해상교통안전성 분석*. 석사학위논문. 목포:목포해양대학교
- [4] Fujii Y. & Mizuki N., 1998. Design of VTS systems for water with bridges. *Ship Collision Analysis, Gluver & Olsen(eds)*
- [5] 김성택 등, 2012. 정량적인 선박 의장시스템 신뢰성 평가를 위한 Dynamic fault tree 작성 및 Bayesian network로의 변환. 2012년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회
- [6] Friis Hansen P. & Pedersen P.T., 1998. Risk Analysis Conventional and Solo Watch Keeping. *International Maritime Organisation Maritiem Safety Committee*, Denmark
- [7] 조익순 등, 2009. 해상교통안전진단제도 및 기술기준 소개, *해양환경안전학회 제14권 제3호*
- [8] Fujii Y et al, 海上交通工學, 1981, 成山堂
- [9] 공인영 등, 2005. 항로가동물의 개념 및 그 이용에 대한 고찰, *선박해양기술 제40호*
- [10] USCG, 2009. Port and Waterways Safety Assessment Workshop Report
- [11] 여인철, 2003. FSA(Formal Safety Assessment), *대한조선학회지 제40권 제1호*
- [12] Gug, S.G. & Jeong, H.S., 2018. A Study on Collision Risk Analysis in Busan Harbour. *IALA Managing Risk*
- [13] Park, Y.S. et al., 2015. A Comparison of ES PARK Maritime Traffic Risk Assessment Models in a Korean Waterway. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*
- [14] 이홍훈, 2014. *해상교통환경 통합위해도 평가모델 개선에 관한 연구*, 박사학위논문. 목포:목포해양대학교

- [15] 해양수산부 Port-MIS 2014~2016년 톤수별, 선종별 입출항 실적, 2017
- [16] Friis Hansen P, 2008. IWRAP MK II Working Document(Basic Modelling Principles For Prediction of Collision and Grounding Frequencies
- [17] 해양수산부, 2017. 선박의 입항 및 출항 등에 관한 법률
- [18] 이학식, 임지훈, 2011. SPSS 18.0 매뉴얼
- [19] 이학식, 2012. 사회과학 연구를 위한 회귀분석
- [20] 성균관대응용통계연구소, 2010. SPSS를 활용한 설문지 자료의 통계분석
- [21] 김성규, 2000. 항만경쟁력제고를 위한 항만물류기능과 항만품질간의 관련성 분석
- [22] 김홍태, 나성, 하옥현, 2011. 해양사고조사를 위한 인적 오류 분석사례. *Journal of the Ergonomics Society of Korea* Vol. 30, pp.137-150.
- [23] 김철승, 이흥훈, 2012. 해상교통환경 위험요소 평가기준 설정을 위한 기초 연구, *해양환경안전학회지 제18권 제5호*, pp.431-438.
- [24] 성유창, 김현욱, 2010. 선박의 교통 흐름을 고려한 항로폭 결정에 관한 연구, *해양환경안전학회 2010년 춘계학술발표회*, pp.143-145.
- [25] A. D. Polyanin, 2002. Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists, *Chapman & Hall/CRC Press, Boca Raton, ISBN 1-58488-299-9*.
- [26] 김인철, 안광, 2016. 인적요인을 고려한 연안해역 위험도 평가모델 비교 · 분석. *한국항해항만학회지 제40권 제1호*
- [27] 김대원, 2011. *해상교통안전성 평가모델 개발을 위한 기초 연구*. 석사학위 논문. 부산:한국해양대학교